

SAIMAAN AMMATTIKORKEAKOULU
Tekniikka, Lappeenranta
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Tuotantotekniikan ja kunnossapidon sv.

Ismo Tynkkynen

NAUHALIITOKSEN LASERHITSAUKSEN KEHITTÄMINEN

Opinnäytetyö 2010

TIIVISTELMÄ

Ismo Tynkkynen

Nauhaliitoksen laserhitsauksen kehittäminen 58 sivua, 5 liitettä.

Saimaan ammattikorkeakoulu, Lappeenranta

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

Tuotantotekniikka ja kunnossapito

Opinnäytetyö 2010

Ohjaaja: Lehtori Veli-Pekka Jurvanen

Tavoitteena oli löytää Compomec Oy:lle toimittaja laserhitsauslaitteistolle kaapelin pitkittäisnauhoituksessa käytettävien metallilaminaattien päittäisliitoksen suorittamiseen.

Teoriaosassa käsiteltiin hitsausprosesseja ja laserhitsausta. Ensin käsiteltiin hitsausta liitosprosessina yleisesti. Laserhitsauksen käsittely aloitettiin perehtymällä laservalon ominaisuuksiin ja työstölaserin kehitykseen. Laserhitsauksella saavutettavia etuja, selvitettiin perinteisiin hitsausprosesseihin verrattuna. Seuraavaksi tutustuttiin yleisimpiin laserhitsausprosesseihin ja niiden hitsausparametreihin. Erilaisiin laserhitsauksen teholähteisiin tutustuttiin ja verrattiin niiden ominaisuuksia toisiinsa. Lopuksi perehdyttiin laserhitsauspäiden erilaisiin rakenteisiin ja niiden toimintaan.

Empiriaosassa tutustuttiin kaapelin pitkittäisnauhoitusprosessiin sekä pitkittäisnauhoituksessa käytettäviin materiaaleihin ja niiden päittäisliitokseen. Compomec Oy:n kehittämään MaxiPad-konseptiin perehdyttiin, konseptin kehittäminen on luonut tarpeen nauhaliitoksen kehitystyölle. Suunniteltavana olevan nauhanliituskoneen spesifikaatioihin tutustuttiin. Kirjattiin ylös liitoksesta vaadittavat ominaisuudet, jotka Compomec Oy määritteli. Näillä lähtötiedoilla etsittiin toimittajia laserhitsauslaitteistolle. Toimittajia etsittiin Internetistä sekä lähdemateriaalina käytetyistä lehdistä ja kirjoista.

Tiedustelu laserhitsauslaitteistosta lähetettiin sähköpostilla 11 yritykselle. Yrityksistä neljä oli kiinnostunut suorittamaan koehitsauksia ja niille lähetettiin testimateriaalia koehitsausta varten. Vain yksi yritys pystyi toimittamaan onnistuneet koehitsausnäytteet pyydettyssä ajassa. Ensimmäisistä koehitsauksista voitiin havaita liitoksen onnistuneen. Hitsatut nauhat olivat kuitenkin liian lyhyitä soveltuakseen vetokokeeseen. Uudet koehitsaukset suoritettiin pidemmällä nauhoilla ja saaduille hitsausnäytteille tehtiin visuaalinen tarkistus ja vetokokeet. Koehitsaukset oli tehty Rofinin sovelluslaboratoriossa Saksassa. Käytetty laitteisto oli Rofinin Star Pulse 150, joka on pulssitettu Nd:YAG –laser. Tulosten perusteella voitiin päätellä kyseisen laserhitsausprosessin soveltuvan nauhojen päittäisliitoksen suorittamiseen.

Avainsanat: laserhitsaus, pitkittäisnauhoitus

ABSTRACT

Ismo Tynkkynen

Development of laser welding in tape jointing process 58 pages, 5 appendices

Saimaa University of Applied Sciences, Lappeenranta

Degree Programme in Mechanical Engineering

Production technology and Maintenance

Bachelor's Thesis 2010

Instructor: lecturer Veli-Pekka Jurvanen

The purpose of this research was to find out a supplier for laser welding equipment to butt jointing metallic tapes which are used in longitudinal tape applications.

In the theoretical part of the study main issues were welding processes and laser welding. Firstly, welding was studied generally as a jointing process. Processing the laser welding was started by exploring the properties of laser light and the history of laser processing. The benefits gained by laser welding were compared against the conventional welding. Secondly the most common laser welding processes and their welding parameters were reviewed. Also the different kind of laser welding power supplies and their properties were examined. Finally the dissimilar structures of laser weldingheads and their functions were studied.

In the empirical part of the study was to get acquainted with longitudinal tape application of cables as well as materials used in longitudinal tape applications and their jointing by butt welding. The MaxiPad concept, which was developed by Compomec Oy that has created a requirement for a development of a tape jointing process, was explored. Then a study of specification of a tape jointing machine which is under drafting was made. The properties of tape jointing, which were determined by Compomec Oy were documented. These are the specifications that are used to find a supplier for the laser welding equipment. Suppliers were searched from the internet and from the publications and literature.

An inquiry for the laser welding equipment was sent via email to eleven companies. Four of them were interested in performing trial welds and they were sent test materials for trial welding. Only one company managed to provide trial welding samples in the requested timeframe. From these weldings it was discovered that actual jointing was successful. Unfortunately the welded tapes were too short to be used in tensile test. New trial welds were performed with longer tapes and weld samples were visually inspected and tested with tensile test. Trial welds were made at Rofin application laboratory in Germany. The equipment that was used is Rofin Star Pulse 150, which is pulsed Nd:YAG –laser. Based on gained results the conclusion can be drawn that the laser welding process in question is suitable for butt jointing of metallic tapes.

Keywords: laser welding, longitudinal tape application

SISÄLTÖ

1 JOHDANTO.....	6
2 HITSAUS.....	7
3 LASERHITSAUS.....	9
3.1 Laservalo.....	9
3.2 Työstölaserin kehitys.....	13
3.3 Laserhitsauksen edut.....	13
3.4 Laserhitsausprosessit.....	14
3.4.1 Avaimenreikähitsaus.....	15
3.4.2 Sulattava hitsaus.....	16
3.4.3 Pulssihitsaus.....	16
3.5 Laserhitsausparametrit.....	17
3.5.1 Laserparametrit.....	17
3.5.2 Prosessiparametrit.....	18
3.5.3 Perusaineen parametrit.....	20
3.6 Laserhitsauksen tehonlähteet.....	21
3.6.1 CO ₂ -laser.....	21
3.6.2 Nd:YAG-laser.....	22
3.6.3 Diodilaser.....	24
3.6.4 Kuitulaser.....	26
3.7 CO ₂ -, Nd:YAG-, kuitu- ja diodilaserin ominaisuuksien vertailu.....	27
3.8 Laserhitsauspää.....	30
4 COMPOMEC OY.....	32
5 NAUHANLIITOS.....	33
5.1 Pitkittäisnauhoitus.....	33
5.2 MaxiPad-konsepti.....	38
5.3 Liitosprosessi.....	39
5.4 Hitsattavat materiaalit.....	42
6 HITSAUKSELTA VAADITTAVAT OMINAISUUDET.....	43
7 TOIMITTAJAN VALINTA.....	43
7.1 Koehitsaukset.....	44
7.2 Koehitsausten tulokset.....	44
8 VALITTU TOIMITTAJA.....	45
8.1 Corelase Oy:n koehitsaukset.....	45
8.1.1 Teräsnauha.....	46
8.1.2 Kuparinauha.....	47
8.1.3 Alumiininauha.....	48
8.2 Koehitsaus laserleikatuilla nauhoilla.....	48
9 KOEHITSAUSTEN TESTAUS.....	49
9.1 Alumiininauhojen vetokoe.....	49
9.2 Kuparinauhojen vetokoe.....	50
9.3 Teräsnauhojen vetokoe.....	51
9.4 Vetokokeiden yhteenveto.....	52
10 PÄÄTELMÄT.....	52
LÄHTEET.....	57

LIITTEET

Liite 1 Nauhan tuote-esite

Liite 2 Sähköpostiviesti suomenkielinen

Liite 3 Sähköpostiviesti englanninkielinen

Liite 4 Application report welding
Liite 5 Vetokokeen tulokset

1 JOHDANTO

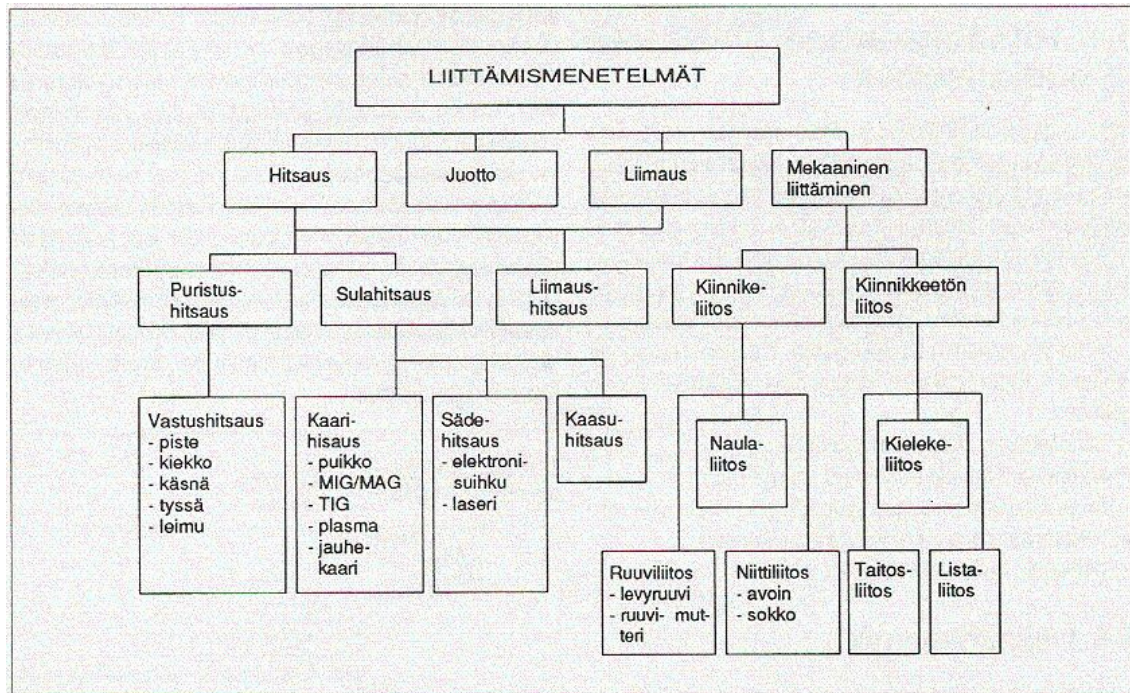
Opinnäyte työ tehtiin Imatralla toimivalle Compomec Oy:lle. Tehtävänä oli etsiä toimittajia laserhitsauslaitteistolle. Compomec Oy kehittää kaapelin pitkittäisnauhoitukseen käytettävien metallinauhojen liitoskonetta. Nauhan jatkamiselle on tarvetta, koska kaapeliytimet ovat yleensä pidempiä kuin niiden päälle ajettavien nauhojen toimituspituus. Nauhan liitos voidaan suorittaa vastushitsauksella, TIG-hitsauksella tai laserhitsauksella kaapelityypistä riippuen. Liitos voidaan tehdä limi- tai päittäisliitoksena. Tässä työssä keskitytään laserhitsauksella tehtävään päittäisliitokseen. Lisäksi keskitytään vain itse laserhitsaukseen eikä muuten liitoskoneen kehitystyöhön.

Käytettävät nauhat ovat alumiini-, kupari- ja teräslaminaatteja. Pinnoitteena käytetään polyeteeniä. Liitos tehdään ilman pinnoitteen poistoa. Nauhanliitoskoneesta on tarkoitus tulla puoliautomaattinen. Liitettävien nauhojen päät leikataan mekaanisella leikkauksella ja asemoidaan vastakkain, jonka jälkeen liitos suoritetaan laserhitsauksena. Näillä lähtötiedoilla oli tarkoitus löytää laserhitsauslaitteistolle toimittajia.

Teorian aineisto on kerätty kirjoista, ammattilehdistä ja internetistä. Teoriaosassa on perehdytty laserhitsaukseen. Työhön liittyvä aineisto on kerätty haastatteluiden avulla. Toimittajiin on pidetty yhteyttä sähköpostitse. Alkukontaktin jälkeen toimittajien kanssa on käyty myös puhelinkeskusteluja. Toimittajille, jotka olivat kiinnostuneet suorittamaan koehitsauksia, lähetettiin nauhoja testejä varten. Saadut koehitsaukset arvioitiin silmämääräisesti. Koehitsauksille ja liittämättömälle nauhalle suoritettiin vetokoe. Saatuja tuloksia verrattiin toisiinsa ja nauhanliitokselta vaadittaviin ominaisuuksiin. Koehitsausten perusteella valittiin toimittaja, jonka kanssa kehitystyötä jatketaan.

2 HITSAUS

Metallituotteiden valmistusmenetelmät voidaan jakaa valamiseen, työstämiseen, liittämiseen ja sintraukseen. Hitsaus on liitosmenetelmä (kuva 1).



Kuva 1 Liittämismenetelmät (Lukkari 1997, 15)

Kuvassa 1 on esitetty hitsauksen sijoittuminen liitosmenetelmiin. Hitsaus on yleisemmin käytetty ja tärkein metallien liittämismenetelmä. Hitsaamalla voidaan liittää myös monia, ei metallisia materiaaleja, kuten muoveja ja keraameja. (Lukkari 1997, 13–23.)

Hitsauksen määritelmä standardin SFS 3052 (1996) mukaan on:

Valmistusmenetelmä, jolla osia liitetään tai päällystetään käyttämällä hyväksi lämpöä ja / tai puristusta siten, että osat muodostavat jatkuvan yhteyden. Hitsauksessa voidaan käyttää lisäainetta, jonka sulamispiste on suunnilleen sama kuin perusaineen.

Liitoksen aikaansaaminen vaatii energiaa. Kaikki hitsausprosessit vaativat energialähteen. Energialähteenä voidaan käyttää sähköenergiaa, kemiallista reaktiota, fokusoitua sädettä, mekaanista energiaa ja diffuusiota. (Lukkari 1997,13–23.)

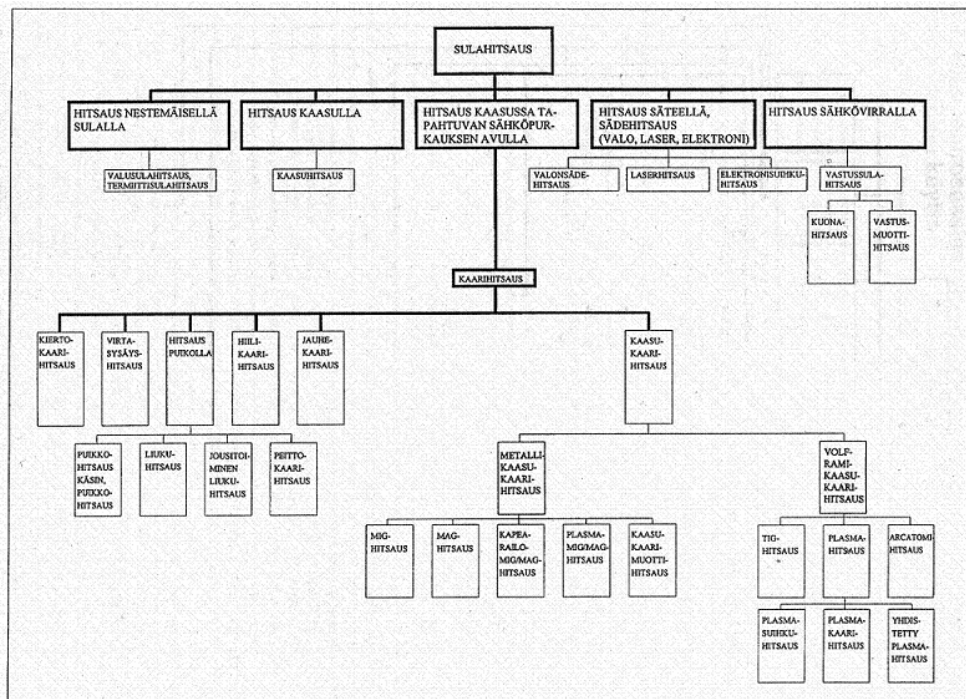
Hitsausprosessien pääryhmittely standardin SFS 3052 mukaan on:

Puristushitsaus: Hitsaus, jossa hitsi saadaan aikaan puristamalla osien liitospinnat toisiinsa mahdollisesti kuumennusta käyttäen.

Sulahitsaus: Hitsaus, jossa hitsi saadaan aikaan ilman puristusta sulattamalla osien liitospinnat käyttäen tai käyttämättä lisäainetta.

Puristushitsaus jaetaan pääryhmiin, joita ovat hitsaus sähkövirralla, nestemäisen sulan avulla, kaasulla ja kiinteällä kappaleella sekä hitsaus kaasussa tapahtuvan sähköpurkauksen avulla. Teollisuudessa tärkeimmät puristushitsausprosessit ovat vastushitsaus, ultraäänihitsaus ja kitkahitsaus. Puristushitsausta ei käsitellä tämän tarkemmin. (Lukkari 1997, 13–23.)

Sulahitsausprosesseja on noin 70 erilaista (kuva 2).



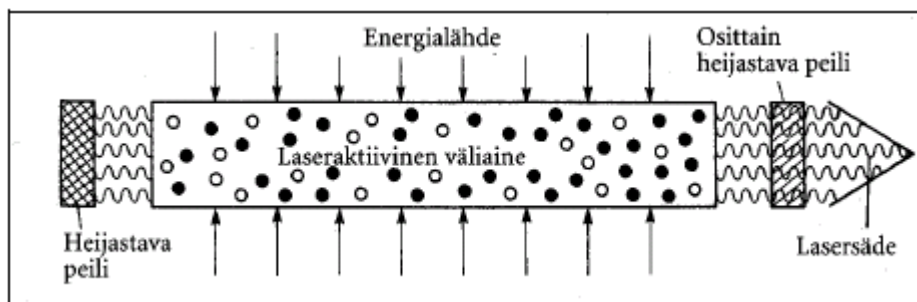
Kuva 2 Sulahitsausprosessit (Lukkari 1997,21.)

Kuvan 2 mukaan suurin ja tärkein ryhmä on kaarihitsaus. Kaarihitsauksessa sähköenergia muutetaan elektrodin ja työkappaleen välissä palavan valokaaren avulla lämmöksi, joka sulattaa työkappaleen ja mahdollisen lisäaineen. Kaarihitsausprosessit voidaan jakaa kahteen ryhmään valokaaren näkyvyyden perusteella. Jauhekaarihitsaus kuuluu hitsaukseen peitetyllä valokaarella ja muut kaarihitsausprosessit kuuluvat hitsaukseen näkyvällä valokaarella. Tärkeimmät kaarihitsausprosessit ovat MIG / MAG-, puikko-, täytelanka-, jauhekaari-, TIG-, ja plasmahitsaus. Sädehitsausprosesseja ovat valonsädehitsaus, laserhitsaus ja elektronisuihkuhitsaus. Laserhitsausta käsitellään tarkemmin luvussa 3. (Lukari 1997, 13–23.)

3 LASERHITSAUS

3.1 Laservalo

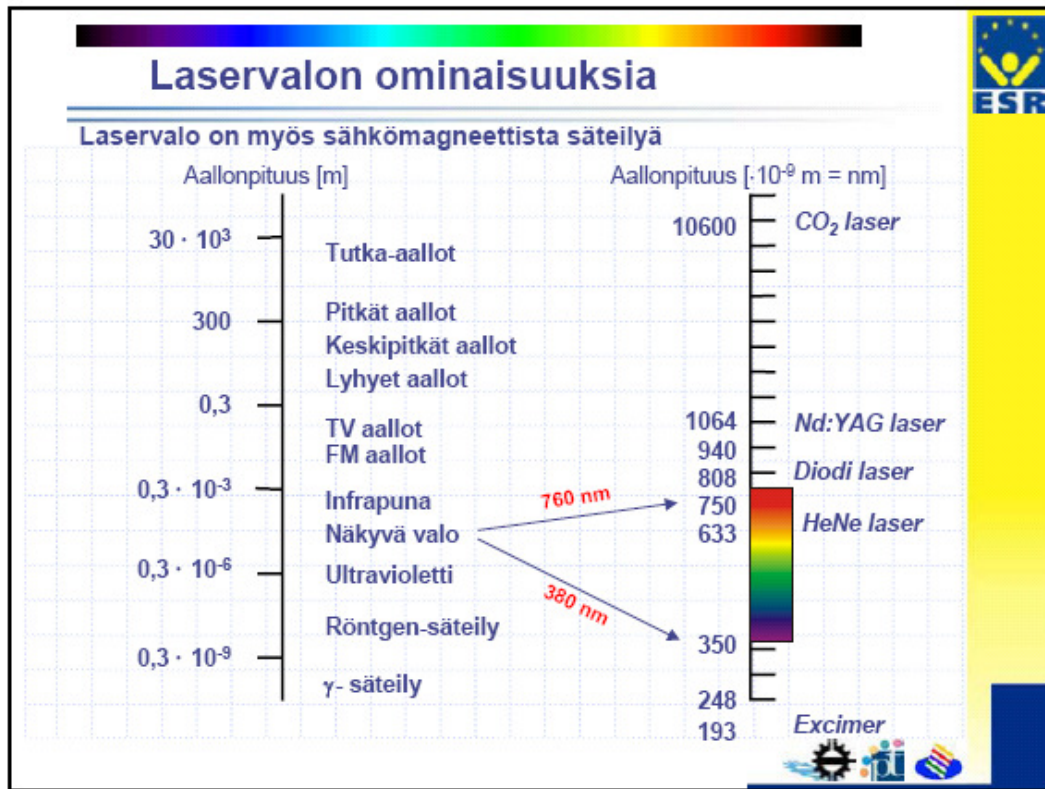
Laser on lyhenne englannin kielen sanoista Light Amplified by Stimulated Emission of Radiation. Laservalo on valoa, joka on vahvistettu stimuloitujen emission avulla. Lasersäde muodostuu kuvan 3 mukaan.



Kuva 3 Laseroinnin periaate (Kujanpää, Salminen, Vihinen, 2005,35; alkuperäinen lähde Dawes 1992)

Säteen muodostumiseen tarvitaan pumppausenergia, laseroiva väliaine ja kaksi peiliä. Säde muodostuu, kun laseroivaa väliainetta pumpataan ulkoisella energialähteellä. Säde syntyy peilien väliin, ja valo kulkee edestakaisin peilien välissä ja voimistaa stimuloitua emissiota. Toinen peileistä on osittain heijastava ja päästää osan säteestä ulos resonaattorista.

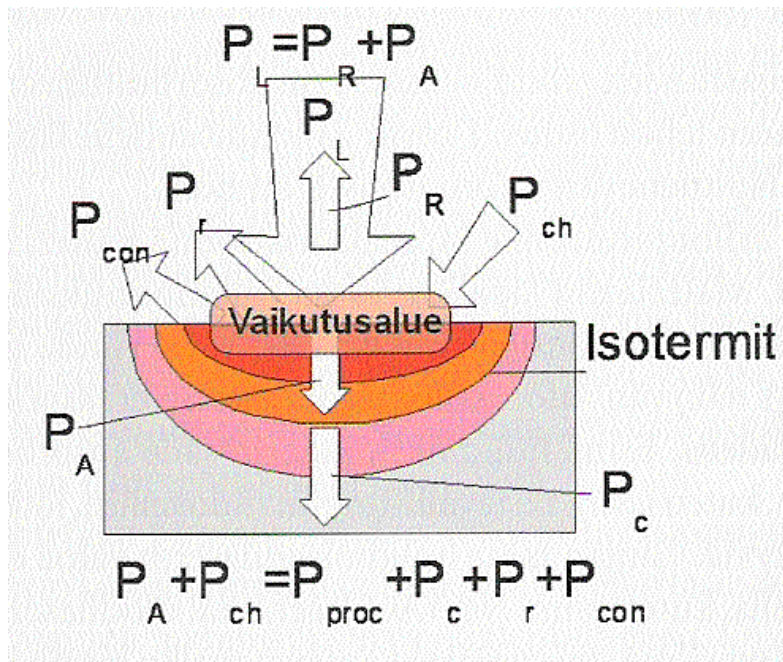
Laservalo on kollimoitua eli yhdensuuntaista valoa, joten säde ei laajene juurikaan matkan funktiona. Laservalo on myös monokromaattista eli yksiväristä, koska sillä on vain yksi aallonpituus (kuva 4).



Kuva 4 Laservalon ominaisuuksia (LaserCo)

Kuvasta 4 käy ilmi yleisimpien työstölaserin aallonpituudet. Laservalo on myös koherenttia eli samenvaiheista. Aaltojen ollessa samenvaiheisia ne voivat vahvistaa toisiaan eli interferoida. (Kujanpää ym 2005, 33–36.)

Kun laservalo osuu materiaalin, osa säteestä heijastuu takaisin, osa taittuu materiaalin sisään ja kulkee sen läpi tai absorptoituu materiaaliin eli materiaali ottaa vastaan laservalon energian ja muuttaa sen lämmöksi (kuva 5).



Kuva 5 Laserprosessin energiatase (Kujanpää ym. 2005,43; alkuperäinen lähde Hugel and Dausinger, 1995)

Laservalon energia jakautuu seuraavasti sen osuessa materiaalin pintaan (kaava 1):

$$P_L = P_R + P_A + P_r \quad (1)$$

P_L = laserteho

P_R = heijastunut osa tehosta

P_A = absorptoitunut osa tehosta

P_T = läpäisevä osa tehosta

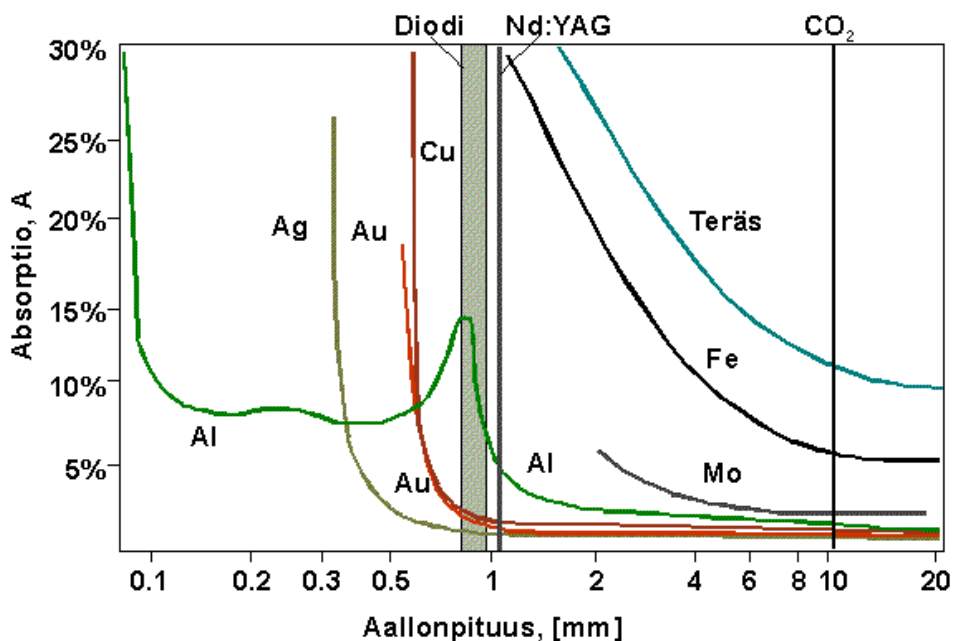
Absorptoitunut teho muodostuu seuraavasti(kaava 2):

$$P_A + P_{ch} = P_{proc} P_r + P_{con} + P_c \quad (2)$$

P_A =	absorptoitunut teho
P_{ch} =	kemiallisista reaktioista syntynyt tai kulunut teho
P_{proc} =	prosessiteho
P_r =	lämpösäteily häviö
P_{con} =	konventiolla pois siirtynyt teho
P_c =	johtumalla pois siirtynyt teho

Materiaalin läpäisevyys laservalolle riippuu materiaalista ja laservalon aallonpituudesta. Metallit ovat laservalon aallonpituuksille läpinäkymättömiä. Tärkeimmät absorptioon vaikuttavat tekijät ovat materiaali, lämpötila, valon aallonpituus ja absorptoitavan pinnan laatu. (Kujanpää ym. 2005, 43–44.)

Kuvasta 6 on esitetty eräiden metallien absorptio riippuvuus aallonpituudesta.



Kuva 6 Erilaisten aallonpituuksien absorptoituminen joihinkin teknisiin materiaaleihin (Salminen)

Kuvasta 6 nähdään, kuinka eri materiaalit absorptioituvat CO₂-, Nd:YAG- ja diodilaserin aallonpituuksilla. Absorptiolla on suuri merkitys valittaessa laserhittausmenetelmää materiaalille. Huoneenlämpötilassa metallien absorptio on varsin alhainen kaikilla aallonpituuksilla. Pienikin absorptio riittää materiaalin pinnan lämpötilan nousuun. Lämpötilan noustessa absorptio kasvaa voimakkaasti, jolloin materiaali kuumenee, sulaa ja lopulta höyrystyy. Absorptioon lasertyöstössä vaikuttaa säteen intensiteetti ja säteen laatu. Intensiteettiä käsitellään tarkemmin luvussa 3.5.1. Absorptioon vaikuttaa myös säteen tulokulma ja polarisaatio. (Kujanpää ym. 2005, 44–46.)

3.2 Työstölaserin kehitys

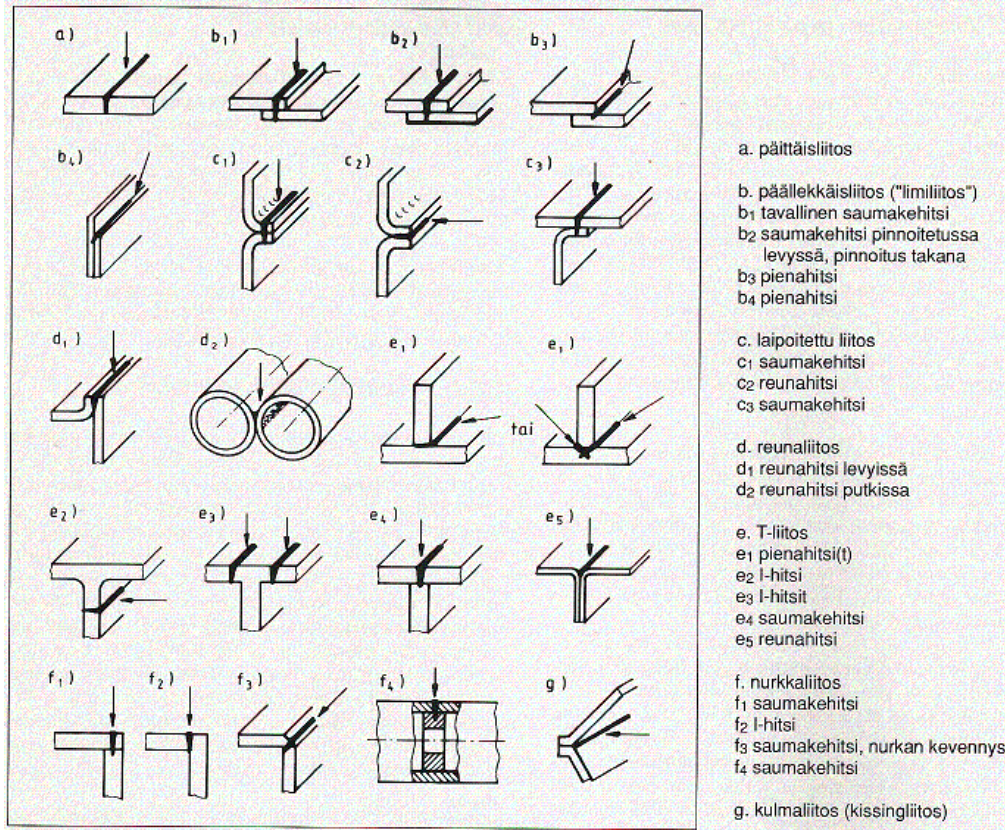
Albert Einstein esitti laserin periaatteen vuonna 1917, vuosiluku vaihtelee lähteestä riippuen. Ensimmäisen toimivan rubiinilaserin rakensi vuonna 1960 Theodore Maiman. Vuonna 1963 kehitettiin CO₂-laser Bellin laboratoriossa, ja ensimmäinen teollinen sovellus CO₂-laserista kehitettiin vuonna 1966 Coherentin laboratoriossa. Hitsaukseen ja pintakäsittelyyn soveltuvat suuritehoiset laserit ovat olleet käytössä 1970-luvun puolivälistä lähtien. (Moisio 1989, 1)

Optisten kuitujen yleistyminen 1980-luvulla edesauttoi laserien kehittämistä. Optiset kuidut ovat hyvä apuväline lasersäteen siirtämiseen. Lasertyöstön kehityksessä uusi laite on tuonut uusia sovellutuksia ja uudet sovellukset ovat lisänneet painetta laserien kehitykseen. Laserhittaus on lasertyöstösovellus. (Kujanpää ym. 2005, 15–16)

3.3 Laserhittauksen edut

Laserhittauksella saadaan useita etuja perinteisiin hitsausmenetelmiin verrattuna. Hitsistä saadaan kapea ja syvä. Tunkeuman syvyyttä rajoittaa vain laserteho. Laserhittauksen lämmöntuonti on alhaisempi kuin perinteisissä hitsausmenetelmissä. Se vähentää loppukoneistuksen tarvetta, vähentää perusaineen metallurgisia muutoksia, kuten voimakasta rakeen kasvua sekä mahdollistaa hitsien sijoittamisen lähelle lämpöherkkiä komponentteja. (Kujanpää ym. 2005, 157–158.)

Laserhitsaus mahdollistaa hyvin monenlaisten liitosten valmistamisen. Kuvassa 7 on esitetty laserhitsauksessa käytettäviä liitosmuotoja.



Kuva 7 Laserhitsauksessa käytettäviä liitosmuotoja (Martikainen & Meuronen 1991, 22)

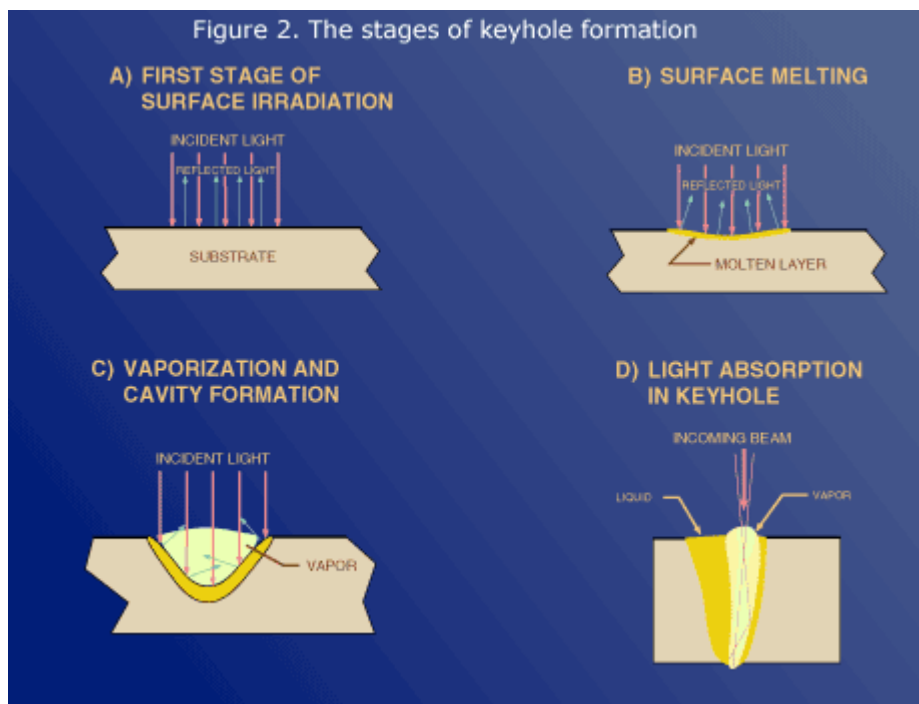
Laserhitsaus antaa mahdollisuuden vapaampaan liitosten sijoitteluun verrattuna perinteisiin hitsausmenetelmiin. Hitsit voidaan sijoittaa lähelle nurkkia ja kulmia sekä ahtaisiin väleihin kuten esimerkiksi kuvan 9 kohdassa d₂ oleva putkien reunahitsi. (Martikainen & Meuronen 1991, 21-22.)

3.4 Laserhitsausprosessit

Laserhitsaus voidaan jakaa avaimenreikähitsaukseen, sulattavaan laserhitsaukseen, pulssihitsaukseen, lisääineelliseen laserhitsaukseen, monipalkohitsaukseen ja hybridihitsaukseen. Seuraavaksi käsitellään lyhyesti avaimenreikähitsausta, sulattavaa laserhitsausta ja pulssihitsausta. (Kujanpää ym. 2005, 157–163.)

3.4.1 Avaimenreikähitsaus

Avaimenreikähitsauksessa eli syvätunkemahitsauksessa säde fokusoidaan työkappaleen pinnalle tai noin 25 % aineenpaksuudesta pinnan alapuolelle, yleensä pinnan normaalin suuntaisena (kuva 8). Materiaaliin höyrystyy reikä, joka johtuu säteen suuresta tehotiheydestä. Terästä hitsattaessa on tehotiheyden ylitettävä 10^6 W /cm^2 , että avaimenreikä muodostuu. (Kujanpää ym. 2005 s. 158–159)

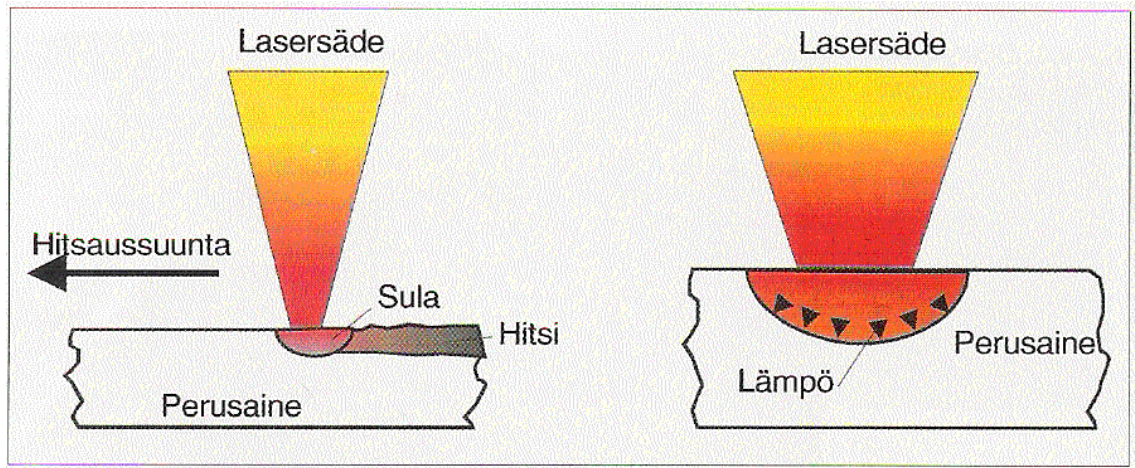


Kuva 8 Avaimenreiän muodostuminen (Laser Kinetics)

Kuvasta 10 nähdään avaimenreiän muodostuminen. Kohdassa A suurin osa säteistä heijastuu takaisin. Kohdassa B kappaleen pinta alkaa sulaa. Kohdassa C sula metalli absorboi huomattavasti enemmän valoa kuin kiinteä metalli. Metallia alkaa kiehua ja muodostaa metallihöyryä. Kohdassa D metallihöyryn paine on avannut käytävän lasersäteelle, jota kutsutaan avaimenreiäksi. Tuloksena on syvä ja kapea hitsi. (Migliore 1998)

3.4.2 Sulattava hitsaus

Sulattavassa hitsauksessa tehotiheys jää alle avaimenreikähitsauksen raja-arvon. Sulattava hitsaus muistuttaa kaarihitsausta (kuva 9).



Kuva 9 Sulattava laserhitsaus (Hitsaustekniikka 5 / 2003, 32)

Materiaalin pinta kuumenee lasersäteen vaikutuksesta ja sulaa. Hitsi on matalampi ja leveämpi kuin avaimenreikähitsauksessa. Absorption vaikutus on suuri sulattavassa hitsauksessa. Kun käytetään hyvin absorptoituvaa aallonpituutta, voidaan sulaa levittää, jolloin railon toleranssit voivat olla lievemmät kuin avaimenreikähitsauksessa. (Kujanpää ym. 2005, 50, 159.)

3.4.3 Pulssihitsaus

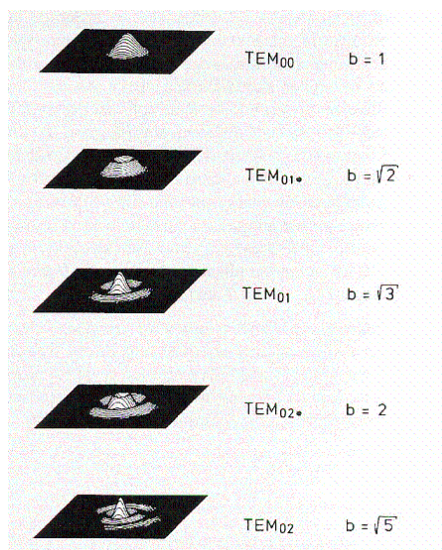
Pulssihitsauksessa lasersäteen teho vaihtelee säännöllisesti ajan mukaan. Pulssihitsauksella saadaan jatkuvaan hitsaukseen verrattuna suurempi tehontiheys, syvempi tunkeuma, kapeampi lämpövyöhyke, suurempi polttopiste sekä voidaan käyttää pidempää polttoväliä. Suurempi tehontiheys helpottaa heijastavien materiaalien, kuten alumiinin, kuparin, kullan ja hopean hitsausta. Pulssihitsauksen heikkous jatkuvaan hitsaukseen verrattuna on pienempi hitsausnopeus, mikä lisää kustannuksia. Lisäksi tehomuutoksista johtuen hitsausprosessi ei ole yhtä vakaa, mikä lisää hitsausvirheiden riskiä. (Kujanpää ym. 2005, 159–160.)

3.5 Laserhitsausparametrit

Laserhitsausparametrit voidaan jakaa sädeparametreihin, prosessiparametreihin ja materiaaliparametreihin. Sädeparametrit ovat laitekohtaisia. Prosessiparametrit voidaan säätää jokaisen hitsaustapahtumaan erikseen. Materiaaliparametrit ovat materiaalienkohtaisia, lisäksi hitsattavien kappaleiden muoto vaikuttaa hitsauksen lopputulokseen. (Väisänen 2008, 10.)

3.5.1 Laserparametrit

Sädeparametrit ovat yleensä vakioita laserhitsaussysteemissä, eikä niitä muuteta hitsausprosessin aikana. Lasersäteen ominaisuuksista polarisaatiolla ja intensiteetillä on vaikutusta hitsauksen lopputulokseen. Polarisaatio vaikuttaa tunkeuman syvyyteen. Polarisaatio tarkoittaa valon, joka on pitkittäistä aaltoliikettä, aallon sähkökentän värähtelyä tietyssä suunnassa (Inkinen, Manninen & Tuohi 2006, 378). Polarisaatioon voidaan vaikuttaa vaihtamalla erikoispeilejä, jolloin peilit on suunnattava uudelleen. Lasersäteen intensiteetti eli teho muuttuu säteen poikkileikkauksessa. Muutosta kutsutaan moodiksi. Säteen fokuusoivuus paranee kun moodiluku pienenee. Kuvassa 10 on esitetty hitsauslaserissa käytettäviä moodeja.



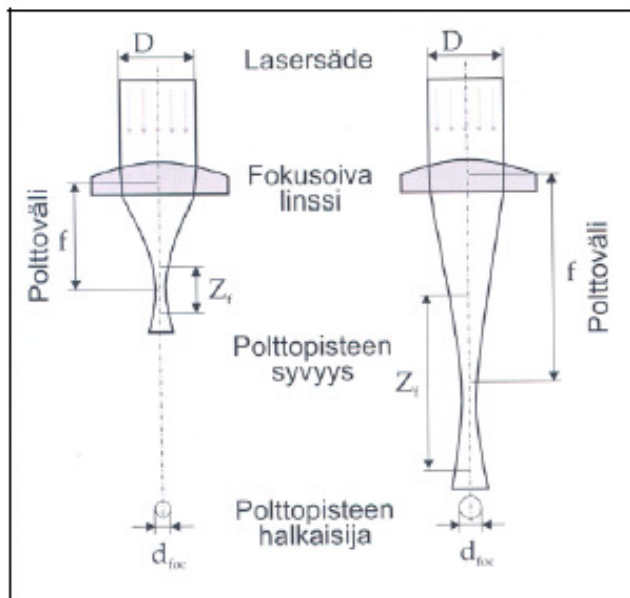
Kuva 10 Laserhitsauksessa käytettäviä moodeja. (Salminen&Kujanpää 1997, 8.)

Laserhitsaussovelluksissa käytetään usein multimoodia TEM_{01} - TEM_{02} tarvittavan tunkeuman saavuttamiseksi. Lasersäteen tullessa ulos laserista säteen poikkileikkauksen pinta-ala alkaa kasvaa. Säteen poikkileikkauksen halkaisijan muutosta määritellään divergenssillä. Divergenssi on säteen leviämiskulman puolikas. Hyvälaatuisen lasersäteen divergenssi on tyypillisesti 1 – 1,5 milliradiaania. (Salminen & Kujanpää 1997, 7-8.)

3.5.2 Prosessiparametrit

Tärkeimpiä prosessiparametreja ovat teho ja hitsausnopeus. Tehoa voidaan tarkastella ulostulotehona ja tehona kappaleen pinnalla. Kappaleen pinnalle tuleva teho on käytännössä tärkeää tietää. Tehon kasvaessa kasvaa tunkeuma. Tunkeumaan vaikuttaa myös hitsausnopeus. Kun tehoa ei muuteta ja hitsausnopeutta kasvatetaan, tulee hitsistä kapeampi ja matalampi. Hitsausnopeuden alarajan määrää avaimenreiän auki pysyminen ja ylärajan haluttu tunkeuma. (Salminen & Kujanpää 1997, 9.)

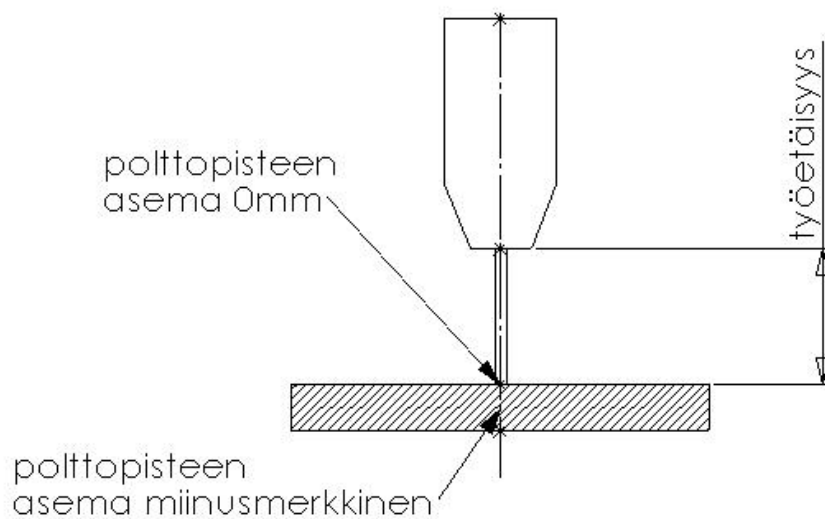
Säteen fokusoinnilla saadaan raakasäteen koko pienennettyä optiikan avulla polttopisteen säteen kokoiseksi (kuva 11).



Kuva 11 Polttovälin vaikutus polttopisteen halkaisijaan. (Kujanpää ym. 2005, 81)

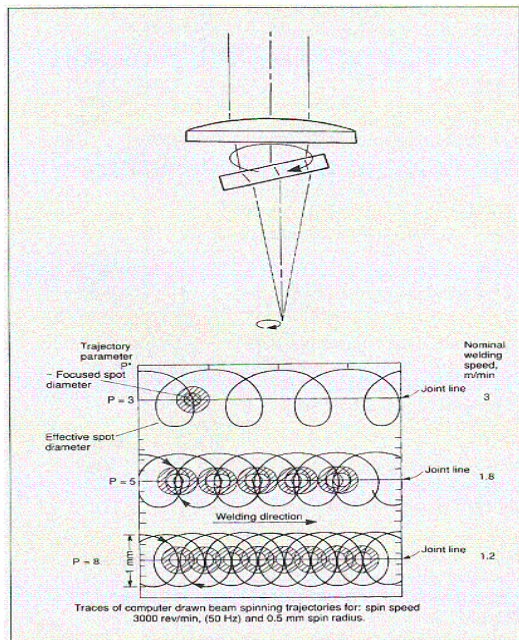
Polttoväli on fokusointilinssin ja polttopisteen välinen etäisyys. Polttovälin pidentäminen kasvattaa polttopisteen halkaisijaa ja pienentää tehotiheyttä. (Väisänen 2008, 11.)

Polttopisteen asema on polttopisteen etäisyys hitsattavan kappaleen pinnasta (kuva 12).



Kuva 12 Polttopisteen asema ja työetäisyys

Oletusarvona polttopiste on hitsattavan kappaleen pinnalla, jolloin polttopisteen arvo on 0 mm. Polttopiste voi olla myös kappaleen pinnan alapuolella, jolloin polttopisteen arvo on miinusmerkkinen kuvan 14 mukaan. Työetäisyydellä tarkoitetaan hitsauspään ja hitsattavan kappaleen välistä etäisyyttä. Työetäisyys pyritään pitämään vakiona hitsauksen aikana. (Salminen&Kujanpää 1997, 12.) Liitoksen toleranssivaatimuksia voidaan väljentää lasersäteen poikkeutuksella (kuva 13).



Kuva 13 Lasersäteen poikkeutus (Salminen&Kujanpää 1997, 13;Alkuperäinen lähde Dawes 1992)

Poikkeutuksella voidaan lisäksi vaikuttaa hitsin energijakaumaan ja muotoilla hitsiä. Poikkeutus voidaan tehdä pyöritys- tai lineaariliikkeellä. Poikkeutus suoritetaan optisella apuvälineellä, jolla poikkeutus saadaan tehdyksi riittävän suurella nopeudella. Poikkeutus muuttaa laserhitsauksen lähemmäs kaarihitsausmenetelmiä (Kujanpää ym. 2005 , 168).

Suojakaasulla on laserhitsauksessa kaksi päätarkoitusta. Se suojaaa hitsiä hapettumiselta ja estää säteen absorboitumisen avainreiän plasmaan. Säteen absorptioituminen plasmaan leventää hitsiä. Suojakaasun tarve riippuu hitsausprosessista. CO₂-laserhitsauksessa käytetään aina suojakaasua. Nd: YAG-laserhitsauksessa suojakaasua käytetään, mikäli hitsin laatu sitä vaatii. Diodilaserhitsauksessa suojakaasua käytetään vain, jos hitsi ei saa hapettua. Suojakaasuna käytetään heliumia, argonia, typpeä, hiilidioksidia ja näiden seoksia. (Kujanpää ym. 2005, 171–172.)

3.5.3 Perusaineen parametrit

Aineenpaksuus vaikuttaa läpihitsaukseen tarvittavan lasertehon määrään. Käytännössä vakioteholla hitsattaessa hitsausnopeus laskee ainepaksuuden kas-

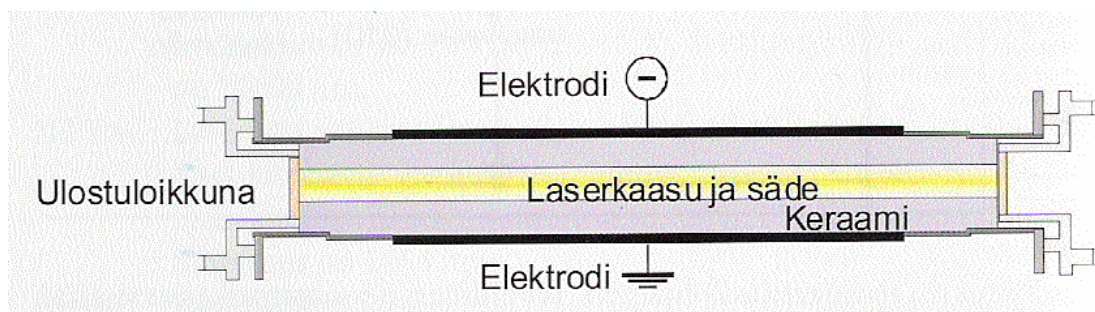
vaessa. Työkappaleen pinnanlaatu vaikuttaa hitsin laatuun. Mitä puhtaampia hitsattavat pinnat ovat, sitä parempi on hitsin laatu. Pinnoitteet, kuten sinkki, alumiini ja maali, aiheuttavat ongelmia etenkin limiliitoksissa. Hitsistä voi tulla huokoinen. Liitoksen ilmarako ei saa olla päittäisliitoksessa juurikaan polttopisteen halkaisijaa suurempi. Mikäli näin on, mahtuu lasersäde kulkemaan liitoksen läpi koskematta railopintoja. Railopintojen laadun on oltava laadultaan niin hyvät, että pinnat voidaan asettaa koko liitoksen matkalta riittävän lähelle toisiinsa. Materiaalin koostumus on tärkein laserhitsattavuuteen vaikuttava tekijä. (Salminen&Kujanpää 1997, 13-14.)

3.6 Laserhitsauksen tehonlähteet

Laserhitsauksessa voidaan käyttää useita eri tehonlähteitä. Tehon lähteitä kehitetään jatkuvasti. Seuraavaksi käsitellään CO₂-, Nd:YAG-kuitu- ja diodilaseria.

3.6.1 CO₂-laser

CO₂ eli hiilidioksidilaserissa säde syntyy resonaattorissa kuvan 14 mukaisesti.



Kuva 14 CO₂-laserin resonaattori (Kujanpää ym. 2005, 56)

Kun optista väliainetta, joka CO₂-laserissa koostuu heliumista, hiilidioksidista ja tyydestä, viritetään sähköenergialla, saadaan aikaan lasersäde. Saatavan säteen aallonpituus on 10,6 µm. CO₂-laserilla päästään 5 - 20 %:n hyötysuhteeseen. CO₂-lasereita, jotka soveltuvat hitsaussovelluksiin on kolmea tyyppiä, nopea pitkittäisvirtauslaser, poikittaisvirtauslaser ja diffuusiojäähdytetty laser. (Kujanpää ym. 2005, 56.)

CO₂-laserin käyttöä rajoittaa se, ettei sädettä voi ohjata kuitua pitkin. Johtuen säteen aallonpituudesta CO₂-laserin säde absorptoituu lasiin ja yleisimpiin muoveihin, eikä näin ollen läpäise niitä. Sädettä suuntaamalla ja manipuloidamalla saadaan CO₂-laserin säde soveltumaan hitsaukseen. (Salminen&Kujanpää 1997, 13-14.)

Taulukosta 1 nähdään eräiden materiaalien CO₂-laserhitsattavuus.

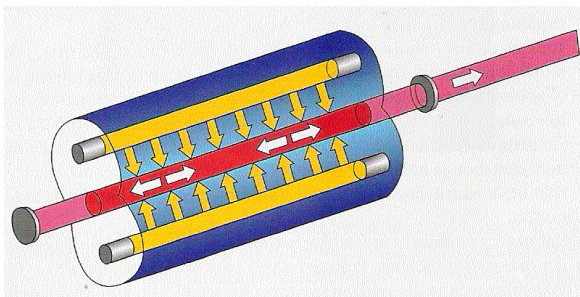
Hyvä	Kohtalainen	Huono
Niukkahiilinen teräs	Sinkitty teräs	Alumiini
Ruostumaton teräs	Messinki	Kupari
Inconel 625	Kovar	Sinkki
Pii pronssi	Työkaluteräs	Hopea
Titaani	Keskihiilinen teräs	Kulta
Tantaali	Runsashiilinen teräs	
Zirkoni	Inconel 718	

Taulukko 1 Materiaalien CO₂-laserhitsattavuus (Salminen&Kujanpää 1997, 29)

Taulukosta 1 nähdään, että CO₂-laser soveltuu huonosti materiaaleille, joiden valon heijastuskyky on suuri.

3.6.2 Nd:YAG-laser

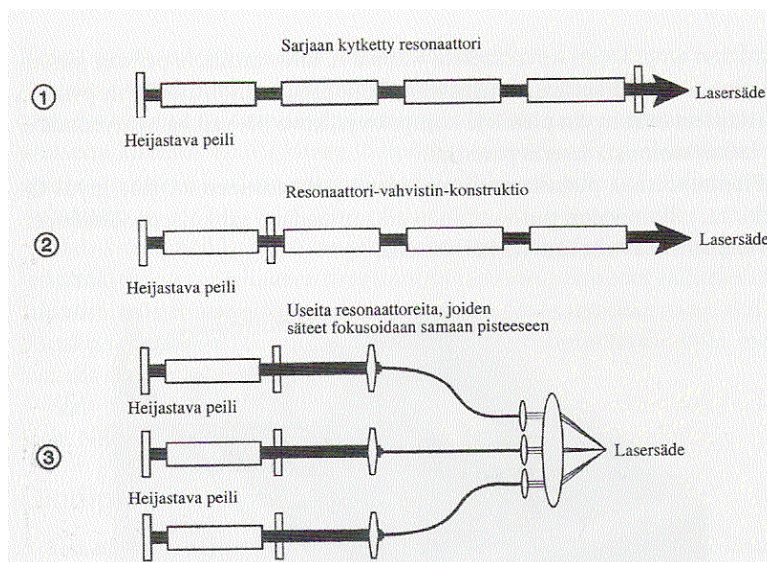
Nd:YAG-laserissa säde syntyy YAG-kiteessä. Kuvassa 15 on Nd:YAG-laserin resonaattori.



Kuva 15 Nd:YAG-laserin resonaattori (Kujanpää ym. 2005, 59)

Tangon muotoista kidettä viritetään kryptonlampuilla. Lamput on sijoitettu elliptisten heijastimien optiselle akselille. Peilit heijastavat suurimman osan lampun valosta kiteeseen. Säteen aallon pituus on 1064 nm, joten sädettä voidaan kuljettaa kuitua pitkin. (Kujanpää ym. 2005, 58-62.)

ND:YAG-laserin tehoa voidaan kasvattaa yhdistämällä kiteitä sarjaan (kuva 16).



Kuva 16 Nd:YAG-laser resonaattorien konstruktioita (Kujanpää ym. 2005, 61; alkuperäinen lähde Skirfors et al, 1995)

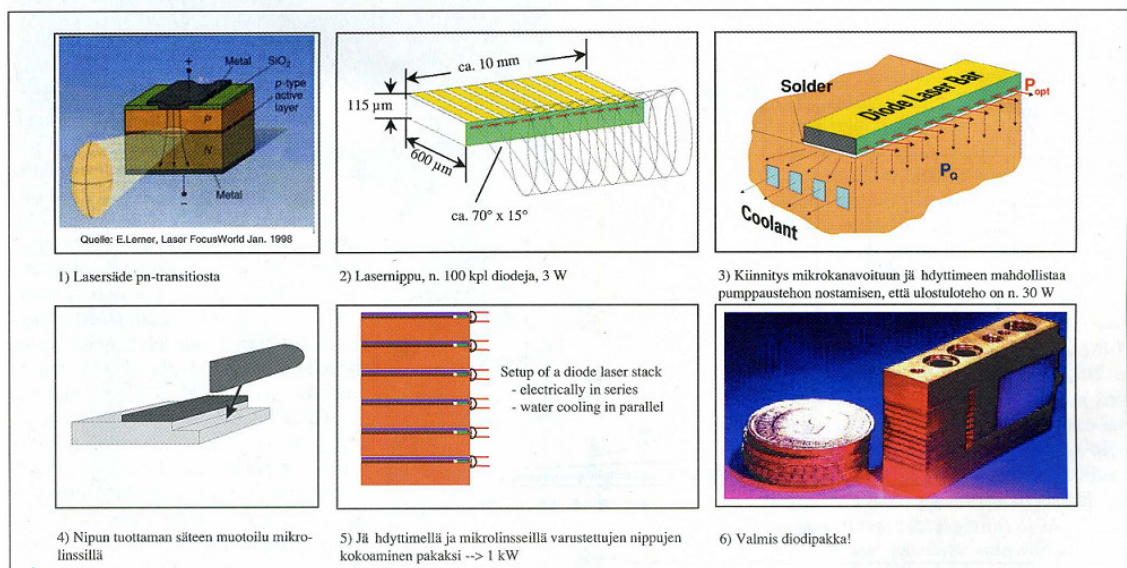
Kiteet voidaan asettaa peräkkäin. Rakennetta käytetään jatkuvatoimisessa laserissa, kuten nähdään kuvan 18 kohdassa 1. Pulssisovelluksissa käytetään kohdan 2 rakennetta, jossa osa kiteistä toimii vahvistimena. Kiteiden tuottama teho voidaan myös yhdistää kohdan 3 mukaan kuitujen avulla vasta työstökohteeseen. (Kujanpää ym. 2005 s. 58-62)

Jatkuvatoimisen Nd:YAG-laserin kokonaishyötysuhde on noin 2 - 3 %. Se soveltuu hitsaukseen ja leikkaukseen. Pulssitettavan Nd:YAG-laserin perusrakenne on periaatteeltaan samanlainen kuin jatkuvatoimisen. Lamppuina käytetään salamalamppuja, joihin syötetään virtapulsseja. Pulssin tehoa, pulssiaikaa, pulssin muotoa ja toistoa voidaan säätää. Hyötysuhde on jatkuvatoimisen Nd:YAG-laserin tasoa. Slab Nd:YAG-laserissa kide on suorakaiteen muotoinen. Ulossaattava teho on suurempi ja säteen laatu hyvä. Se on noin 50 % kalliimpi

kuin perinteinen Nd:YAG-laser. Diodipumpatussa Nd:YAG-laserissa lamput on korvattu diodeilla. Kokonaishyötysuhteeksi saadaan 20 - 25 %. Lisäksi pumpausdiodien käyttöikä on jopa 10 000 tuntia, kun pumpppauslampppujen käyttöikä on vain 500 - 1000 tuntia. Tankomaisen kiteen rinnalle on kehitetty ohut kiekkomainen kide. Kiekkomaisen kiteen jäähdytys on tehokkaampaa kuin tankomaisen. Säteen laatu on parempi tankomaisella kiteellä saatuun säteeseen verrattuna. (Kujanpää ym. 2005, 58–65.)

3.6.3 Diodilaser

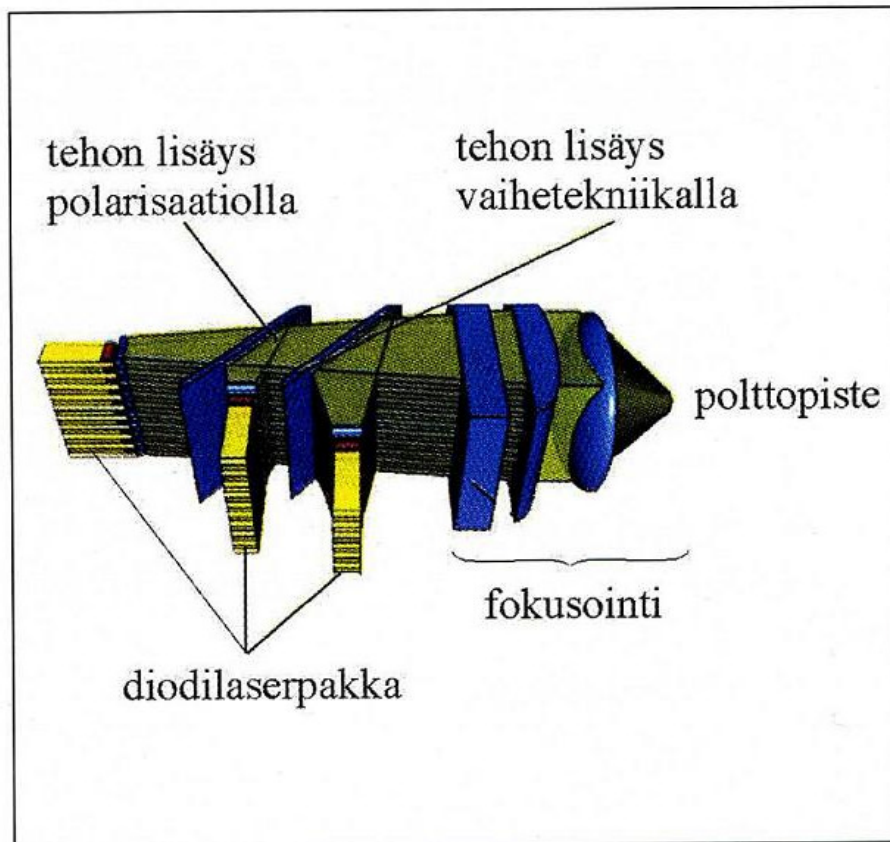
Suuritehoinen diodilaser koostuu useista pienistä 1 - 2 W:n diodilasereista. Laserointi tapahtuu diodien kiillotettujen päätyjen välillä (kuva 17).



Kuva 17 Diodilaserin pakan rakenne (Jansson & Salminen 2001, 50)

Diodit kootaan noin 20 kappaleen nippuihin. Diodilasernipun tehoa rajoittaa sen lämpiäminen. Kiinnittämällä nippu kupariseen lämmönvaihtimeen saadaan tehoa nostettua. Sen jälkeen nippuun asennetaan mikrolinssi, jolla säde kollimoidaan eli säde saadaan yhdensuuntaiseksi. Diodilaserin teho saadaan nostettua lasertyöstön vaatimalle tasolle liittämälle edellä mainittuja nippuja peräkkäin noin 30–40 kappaletta. Näin saadaan moduuli eli pakka, jonka teho on 750 – 1000 W.

Diodilaserin tehoa saadaan kasvatettua kuvan 18 mukaan.



Kuva 18 Diodilaser-pakkojen yhdistäminen (Jansson & Salminen 2001, 51)

Tehon lisäys tapahtuu liittämällä säteet samalla optiselle akselille polarisaation avulla ja yhdistämällä eri aallonpituuksia. Rakenteesta johtuen voi diodilaseria päivittää suurempitehoiseksi vaihtamalla pakat suurempitehoisiksi tai lisäämällä niiden määrää. Jansson & Salminen 2001, 48–51.)

Laserista ulostulevan säteen polttopisteen koko riippuu laserin tehosta ja rakenteesta, mutta on paljon suurempi kuin muiden perinteisten laserien. Suuritehoisessa diodilaserissa päästään noin 30 %:n hyötysuhteeseen. Diodien eliniäksi on arvioitu 10 000–20 000 tuntia. Diodit ovat rakenteen ainoita kuluvia osia. Kuten Nd:YAG-laserin sädettä, voidaan myös diodilaserin sädettä siirtää optisen kuidun avulla. Kuitu mahdollistaa laserin joustavamman käytön. (Kujanpää ym. 2005, 65–67.)

Diodilaserit ovat pienikokoisia ja kevyitä ja niitä voidaan liikuttaa nopeasti (kuva 19).



Kuva 19 Diodilaserhitsausta teollisuusrobotilla (Laser Co)

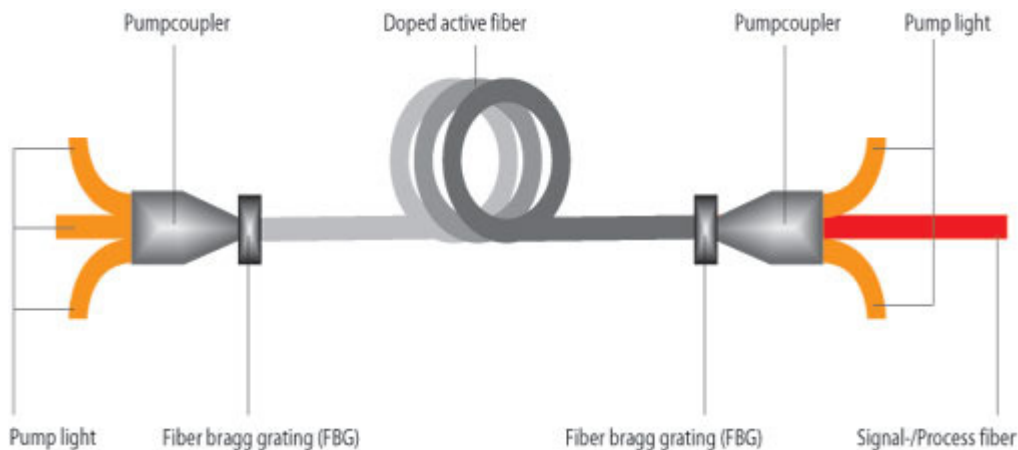
Kuvassa 19 diodilaser on sijoitettu teollisuusrobotin käsivarteeseen. Diodilaser voidaan sijoittaa myös robotin runkoon ja tuoda säde kohteeseen kuidun avulla.

Diodilaser toimii parhaiten ohuiden materiaalien sulattavassa hitsauksessa. Diodilaserilla voidaan hitsata samoja materiaaleja kuin perinteisillä sulattavilla menetelmillä. (Venkat 2008.)

Diodilaserilla voidaan hitsata myös muoveja kuten HDPE:tä (high density polyethylene) (Kujanpää ym. 2005, 65–67).

3.6.4 Kuitulaser

Kuitulaserissa säde synnytetään suoraan optisen kuidun muodostaman resonattorin sisään (kuva 20).



Kuva 20 Kuitulaser (Rofin)

Pumppausenergia tuodaan kuidun päästä sisään, jolloin se läpäisee laseroivan kerroksen edessään useita kertoja kokonaisuheijastuksen ansiosta. Syntynyt säde on pieni halkaisijaltaan ja säteen laatu hyvä. Kuitulaser on vasta tekemässä tuloaan teollisiin sovelluksiin, nyt sitä käytetään lähinnä merkkauksovelluksiin. (Kujanpää ym. 2005, 68.)

Kuitulaserin säteen laatu on ylivoimainen muihin lasereihin verrattuna. Sen aallonpituutta voi säätää. Valotehoa on mahdollista kasvattaa kuituvahvistimella, joka on suhteellisen helppo liittää laserosaan. Verrattaessa eri laserlähteiden hintaa valotehoa kohti (€ / W), kuitulaser on ND:YAG- ja CO₂-laseria edullisempi ja diodilaseria kalliimpi. Hankintahinnaltaan kuitulaser on CO₂-lasereita kalliimpi. (Pessa 2004, 30–31.)

3.7 CO₂-, Nd:YAG-, kuitu- ja diodilaserin ominaisuuksien vertailu

Taulukossa 2 on vertailtu CO₂-, Nd:YAG- ja diodilaserien ominaisuuksia.

	Diodilaser	Nd:YAG laser	CO₂ laser
Suurin jatkuva teho	8 kW:iin asti	5 kW:iin asti	60 kW:iin asti
Aallonpituudet	790 – 980 nm	1 064 nm	10 600 nm
Polttopiste	1,8 mm ² (3 kW)	0,07 mm ² (3 kW)	0,02 mm ² (3 kW)
Hyötysuhde	25 – 40 %	3 – 5 %	10 – 15 %
Absorptio metalliin 20°C	30 – 40 %	25 – 35 %	5 – 10 %
Tehotiheys	- 10 ⁶ W/cm ²	- 10 ⁹ W/cm ²	- 10 ⁸ W/cm ²

Taulukko 2 Eri laserien ominaisuuksien vertailu (Salminen 2002)

CO₂-laserin vahvuuksia ovat suuri teho, pieni polttopiste ja suuri tehontiheys. Heikkoutena on huonoin absorptio metalliin ja alhainen hyötysuhde. Nd:YAG-laserilla on suurin tehontiheys ja pienin hyötysuhde. Diodilaserilla on paras hyötysuhde ja absorptio metallin. Diodilaserin tehontiheys on pienin ja polttopisteen halkaisija suurin.

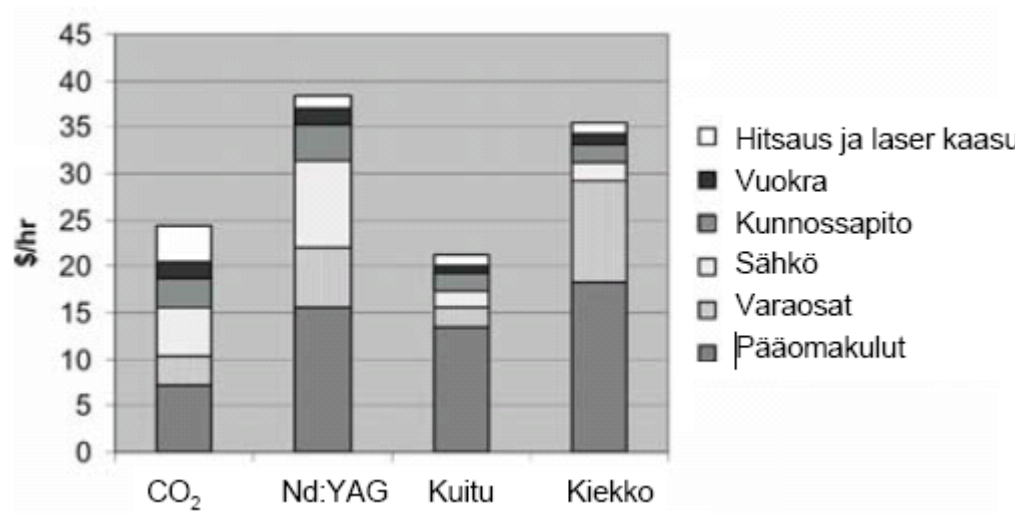
Taulukossa 3 on vertailtu CO₂-, Nd:YAG- ja diodilaserien soveltuvuutta teollisuuden käyttöön.

	Diodilaser	Nd:YAG laser	CO₂ laser
Käyttökustannukset	Alhaiset	Korkeat	Keskimääräiset
Investointi	40 – 125 €/W	100 – 150 €/W	40 – 100 €/W
Laserlaitteiston koko	1 cm ³ / W	10 cm ³ / W	1 000 cm ³ / W
Säteensiirto	Linssi, kuitu, (peilit)	Kuitu, linssi, (peilit)	Peilit, linssit
3D työasema	Teollisuusrobotti	Teollisuusrobotti	Portaalirobotti
Integroitavuus	Helppo	Keskinkertainen	Vaikein
Säteen muoto	Pyöreä, neliö tai suorakaide	Pyöreä	Pyöreä, neliö tai suorakaide

Taulukko 3 Eri laserien soveltuvuus teolliseen käyttöön (Salminen 2002)

CO₂-laser on suurikokoisin suhteessa tehoon ja vaikeimmin integroitavissa. Käyttökustannuksiltaan se on keskitasoa ja hankintahinnaltaan se on diodilaserin luokkaa. Nd:YAG-laser on hankintahinnaltaan ja käyttökustannuksiltaan kallein. Diodilaser on käyttökustannuksiltaan edullisin, pienikokoisin suhteessa tehoon ja on helpoimmin integroitavissa.

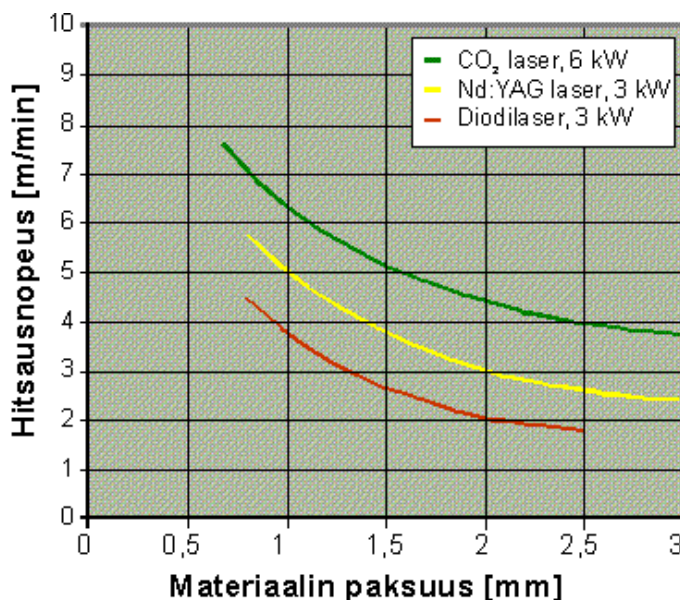
Kuvassa 21 on vertailtu lasertyyppien käyttökustannuksia.



Kuva 21 Lasertyyppien käyttökustannukset (Salminen 2006)

Kuitulaserin kokonaiskäyttökustannukset ovat kaikkein edullisimmat. Kuvasta huomataan myös kuitulaserin käyttökustannusten edullisuus. Vertailussa ei ole ollut mukana diodilaseria. Kiekkolaser on Nd:YAG-laserin sovellus.

Kuvassa 22 on esitetty CO₂-, Nd:YAG- ja diodilaserien hitsausnopeuksia aineenpaksuuden funktiona.



Kuva 22 Hitsausnopeuden suhde materiaalin paksuuteen (Salminen 2002)

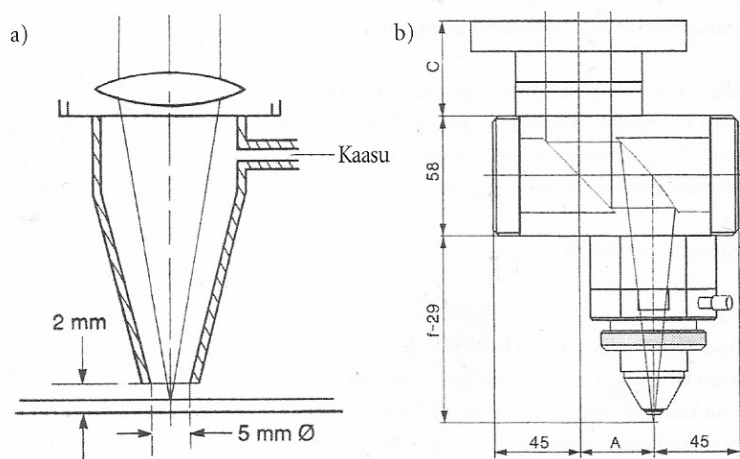
Kuvaaja on tehty sinkityn teräslevyn hitsauksesta. Diodilaserin hitsausnopeus on alhaisempi kuin CO₂- ja Nd:YAG-laserin, mikä johtuu pääasiassa sulattavan hitsauksen ja avaimenreikähitsauksen eroista.

Diodilaser on hyvä sulattavassa hitsauksessa. CO₂ - laserin käyttö sulattavaan hitsaukseen edellyttää pienen tehotiheyden käyttöä suhteessa hitsausnopeuteen, mikä heikentää hyötysuhdetta. Nd:YAG-laseria voidaan käyttää sulattavassa hitsauksessa kasvattamalla polttopisteen kokoa. Se ei ole kuitenkaan taloudellisesti kilpailukykyinen diodilaserin kanssa. (Salminen 2002.)

3.8 Laserhitsauspää

Lasertyöstöpää on prosessikohtaan sijoittuva fokusointiyksikkö. Siihen on sijoitettu suoja- ja prosessikaasun syöttö, lisääineen syöttö ja korkeuden seurannassa tarvittavat laitteet. Suurin ero lasertyöstöprosessien välillä tulee niissä käytettävistä työstöpäistä.

Laserhitsauspäässä säteen fokusointi voidaan toteuttaa peileillä tai linssillä (kuva 23).



Kuva 23 Laserhitsauspään optinen järjestely (Kujanpää, ym 2005, 123)

Kohdassa A fokusointi on toteutettu linssillä ja kohdassa B peileillä. Metallipeilin tehokas jäähdytys on helpompaa kuin linssien, mikä lisää tehontiheyden kestävyttä. Linssi on peiliä herkempi epäpuhtauksille ja roiskeille, jotka lisäävät

linssin lämpenemistä. Linssi voidaan suojata suojaikkunalla, joka likaantuu linsin asemasta. Hitsaussovelluksissa prosessikaasu ei puhalla pois hitsauksessa syntyviä roiskeita. Parempi keino linssin suojaamiseen on linssin ja prosessin väliin sijoitettu, nopea poikittainen kaasuvirtaus. Kaasuvirtaus kuljettaa syntyneet huurut ja roiskeet pois linssistä.

Hitsauspää tuo suojakaasun prosessiin. Suojakaasu voidaan tuoda koaksiaalisesti lasersäteen ympärillä (kuva 24) tai ulkopuolisella suuttimella (kuva 25). (Kujanpää ym. 2005, 121–124.)



Kuva 24 Peilioptiikalla toteutettu CO₂-laserin hitsauspää (Precitec)



Kuva25 Linssioptiikalla toteutettu Nd:YAG -,ja diodilaserin hitsauspää (Precitec)

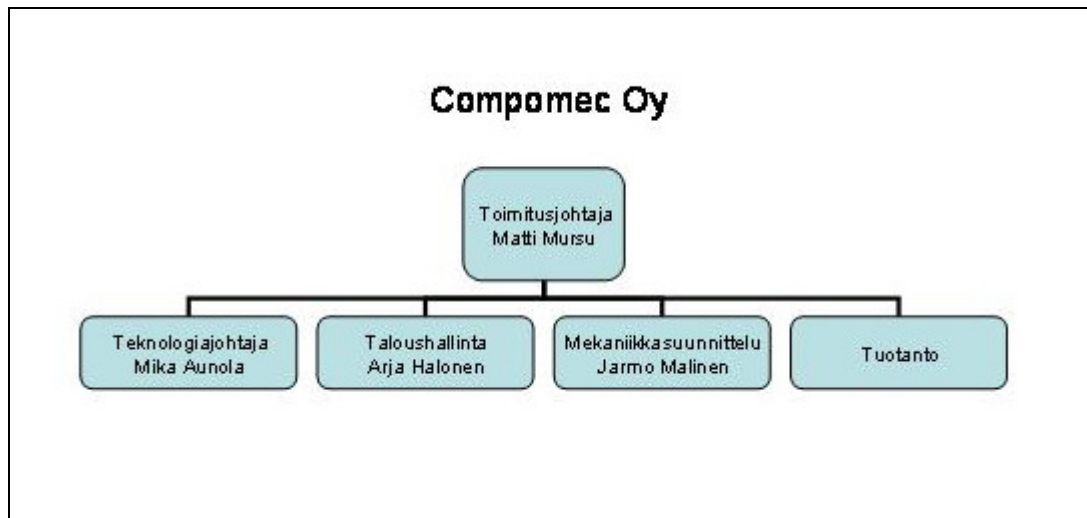
Kuvassa 24 on peilioptiikalla toteutettu CO₂-laserin hitsauspää, jossa suojakaasu tuodaan erillisillä suuttimilla. Kuvassa 25 on linssioptiikalla toteutettu Nd:YAG- ja diodilaserin hitsauspää, jossa suojakaasu tuodaan koaksiaalisesti.

4 COMPOMEC OY

Compomec Oy on koneautomaatioyritys, joka on perustettu 1993 Imatralla. Se on erikoistunut kaapelikoneiden suunnitteluun ja valmistukseen. Vuoteen 1996 saakka yritys toimi yhden miehen suunnittelutoimistona. Vuonna 1996 Compomec Oy solmi alihankintasopimuksen Nokia-Maillefer Oy:n (myöh. Nextrom Technologies Oy) kanssa. Sopimus sisälsi valokuitukaapelikoneiden suunnittelun, tuotekehityksen ja valmistuksen. Valmistettavat koneet olivat kaapelilinjan alkupäässä olevat valokuidun aukirullaajat, loppupäässä olevat vastaanotto-puolaajat sekä nauhan aukirullaajat.

Ensimmäisinä vuosina liikevaihto kaksinkertaistui vuosittain. Nopeasta kasvusta johtuen henkilöstön määrä kasvoi nopeasti, suurimmillaan henkilömäärä oli vuonna 2002 noin 30 henkilöä, joista puolet tuotannossa ja puolet suunnittelussa ja hallinnossa. Valokuitukaapelialan taantuman vuoksi tilauskanta väheni merkittävästi vuonna 2002. Vuonna 2004 Compomec Oy osti Jipka Oy:ltä paperipinonkääntäjien liiketoiminnan. Vuonna 2005 sopimus Nextrom Technologies Oy:n kanssa loppui, ja Compomec Oy jatkoi toimintaa itsenäisenä kaapelikonevalmistajana. Vuonna 2006 paperipinonkääntäjä liiketoiminta myytiin Astex Oy:lle ja aloitettiin yhteistyö Maillefer Extrusion Oy:n kanssa kaapelikoneiden valmistuksesta. Vuonna 2007 alkoi yhteistyö hollantilaisen Inhol BV:n kanssa kutistemuoviletkukoneiden valmistuksessa.

Kuvassa 26 on esitetty Compomec Oy:n organisaatio vuonna 2010.



Kuva 26. Compomec Oy:n organisaatio vuonna 2010

Matti Mursun, henkilöstö- ja talousjohtajan, toimenkuvaan kuuluu operatiivisen johtamisen lisäksi markkinointi. Mika Aunola on Compomec Oy:n pääomistaja. Hänen tehtäviään ovat tuotekehitys ja sähkösuunnittelu. Compomec Oy:n taloushallintoa hoitaa Arja Halonen. Jarmo Malinen vastaa mekaniikkasuunnittelusta. Vuonna 2010 tuotannossa on 4 henkilöä.

5 NAUHANLIITOS

5.1 Pitkittäisnauhoitus

Seuraava aineisto on koottu puhelinhaastattelusta 29.1.2010 Pekka Silvennoisen kanssa. Silvennoisella on 25 vuoden kokemus kaapelikoneista ja kaapelin valmistuksesta. Hän työskentelee tällä hetkellä projektipäällikkönä Maillefer Ex-turusion Oy:ssä Vantaalla.

Kaapelin valmistuksessa käytetään nauhamaisia materiaaleja esimerkiksi kaapeliytimen ja päällysmateriaalin välissä. Nauha voidaan laittaa kaapelin päälle kiertämällä tai pitkittäisnauhoituksena. Päälle kiertäminen on hidas prosessi ja

vaati raskaita koneita. Nauha toimii mekaanisena suojana, häiriö- ja / tai kosteussuojana. Nauha voi olla muovia tai metallia kaapelin käyttötarkoituksesta riippuen. Metallinauhat ovat terästä, ruostumatonta terästä, kuparia tai alumiinia. Metallinauhat voivat olla myös laminaatteja eli ne on pinnoitettu esimerkiksi polyeteenillä. Pinnoitus voi toisella puolella nauhaa tai molemmin puolin. Pinnoitus helpottaa nauhan liimausta. Alumiinin pinnoitus pienentää kitkaa. Pinnoittamaton alumiini voi leikata kiinni muotoilutyökaluihin tai puristinpäähän. Pinnoitus vaikeuttaa hitsausta, juottamista ja heikentää sähköisiä ominaisuuksia.

Kuvassa 27 on esitetty Nestor Cables Oy:n valmistaman kanava- ja maavalokaapelin rakenne.



Kuva 27 Valokuitukaapelin rakenne (Nestor Cables)

Kuvassa 27 numerolla 5 merkitty nauha on keskiöputken ympärillä oleva pituussuuntainen paisuva nauhoitus. Kaapelinkuoren rikkoutuessa vesi imeytyy kapilaari-ilmiöstä johtuen kaapeliin. Paisuva nauhoitus paisuu vedestä ja estää veden kulkeutumisen pidemmälle. Kuvassa numerolla 6 merkitty nauha on muovipääällysteinen, poimutettu eli korrukoitu teräsnauha limityksellä, joka toimii mekaanisena suojana. Teräsnauhan nimellispaksuus 0,15 mm (Nestor Cables.)

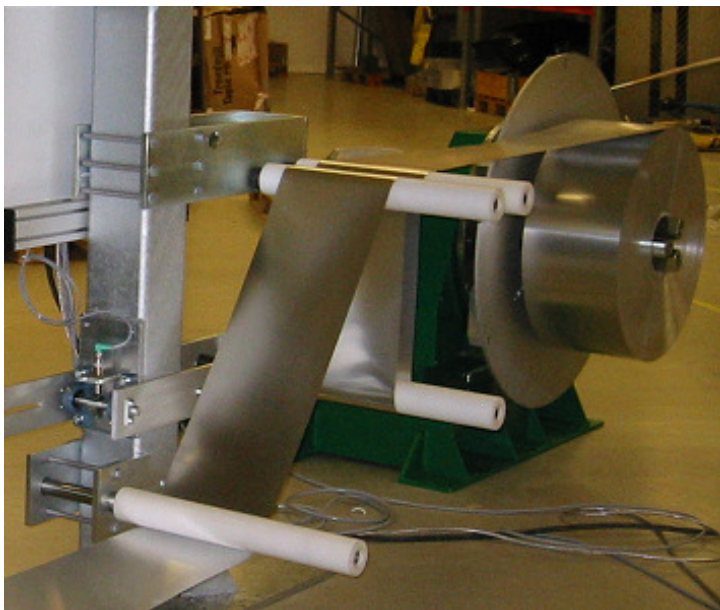
Teräsnauhaa käytetään mekaanisena vahvikkeena. Teräsnauha täytyy korruroida, muuten nauhavaippa voi lommahtaa kaapelia taivuttaessa. Korrukointi voidaan tehdä nauhaan valmiiksi ennen sen taivuttamista kaapelin päälle tai kaapeli voidaan korruroida, kun nauha on taivutettu kaapelin ympärille. Kuparilla on hyvät sähköiset ominaisuudet, ja sitä on helppo liittää ja muotoilla. Sen huonona puolena on kallis hinta.

Alumiininauha on helppo muotoilla, ja sillä on hyvät sähköiset ominaisuudet. Muovinauhaa käytetään joustavana välikerroksena lisäämään liiman tarttuvuut-

ta. Muovinauhaa käytetään myös vesieristeenä alumiininauhan kanssa. Muovinauha voi olla esimerkiksi pehmeää PE-muovia (polyethylene) tai kovaa PET-muovia (polyethylene terephthalate).

Helposti muovailtavat nauhat esimerkiksi PE-nauhat voidaan muotoilla rengasmaisten silmukoiden avulla putken muotoisiksi ennen puristinpäätä. Metallinauhan taivutetaan kaapelin päälle muotoilutyökalujen avulla. Kuvissa 28 - 32 on kuvattu alumiininauhan pitkittäisnauhoitus prosessi.

Nauha tulee kaapelilinjaan aukirullaaimelta (kuva 28).



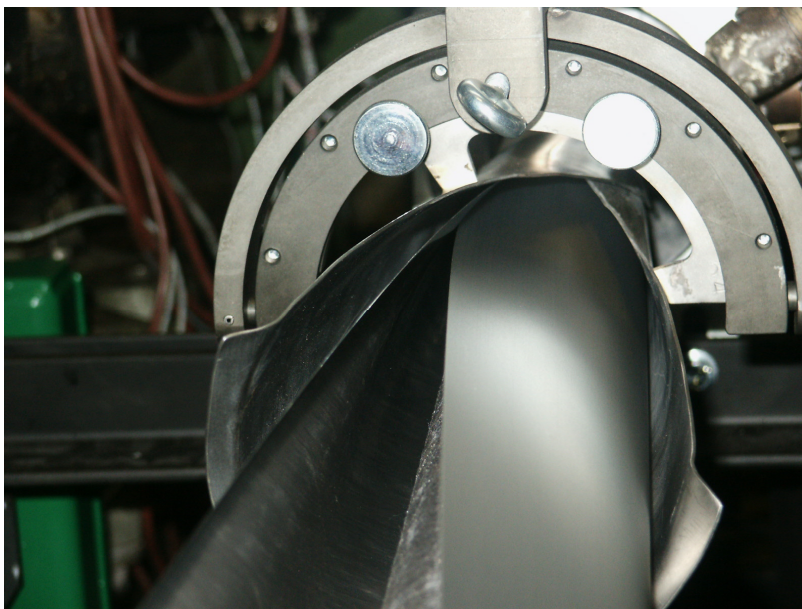
Kuva 28 Nauhan aukirullaaja (Compomec Oy)

Aukirullaaja purkaa nauhaa kaapelilinjaan linjanopeuden mukaan. Kuvassa näkyvien rullien avulla säädetään nauhan kireyttä. Nauha ohjataan taittorullien avulla kaapeliytimen kanssa muotoilutyökalulle (kuva 29).



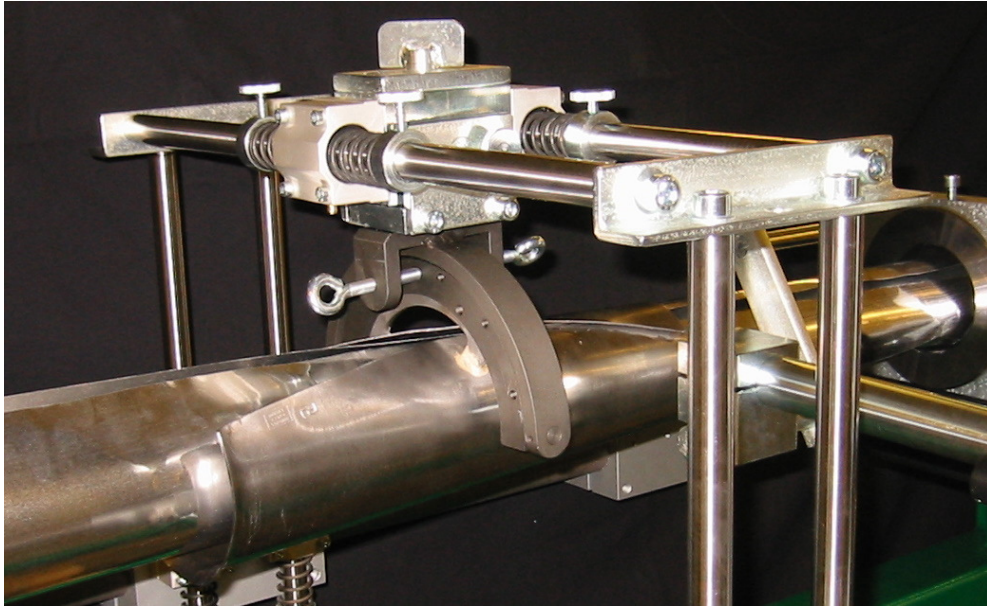
Kuva 29 Nauha ja kaapeliydin (Compomec Oy)

Kaapeliydin kulkee nauhan päällä muotoilutyökalulle. Muotoilutyökalun koko muuttuu kaapelin halkaisijan mukaan. Muotoilutyökalu taivuttaa nauhan kaapelin ympärille putkeksi (kuva 30).



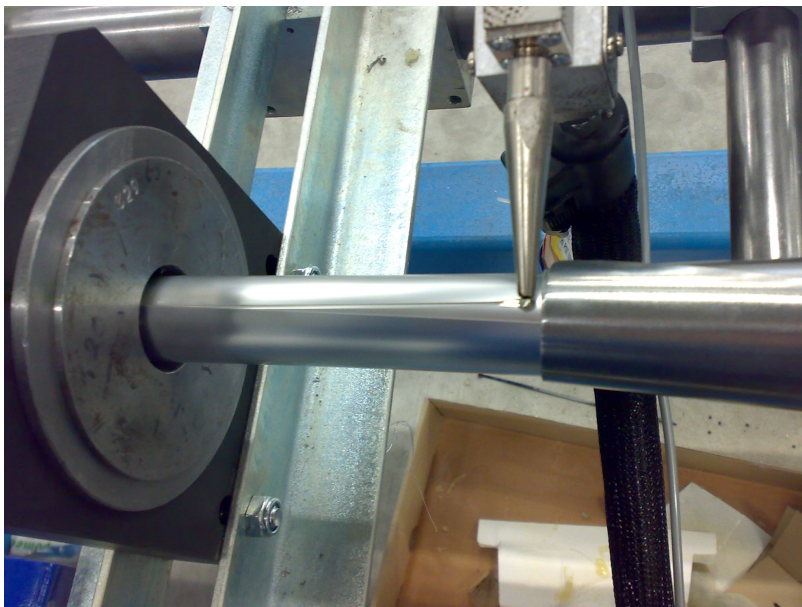
Kuva 30 Nauha muotoutuu putkeksi (Compomec Oy)

Nauhan leveys on valittu niin, että saadaan haluttu limitys. Muotoilutyökalu on kartion muotoinen, joten se taivuttaa nauhan vaiheittain putkeksi (kuva 31)



Kuva 31 Muotoilutyökalu (Compomec Oy)

Muotoilutyökaluja on useita eri tyyppejä. Limitys voi olla jopa 720 astetta eli nauha kiertää kaapelin kaksi kertaa. Muotoilutyökalu voi olla myös kaksikerroksinen eli kaapelin päälle ajetaan kaksi nauhaa samanaikaisesti. Muotoilutyökalun jälkeen limitykseen pursotetaan kuumaliima (kuva 32).



Kuva 32 Kuumaliiman pursotus (Compomec Oy)

Kuumaliima tekee liitoksesta vesitiiviin. Kuvassa vasemmalla näkyvä supistusholkki kiristää liitosta ennen puristinpäättä.

Puristinpäässä kaapelin ympärille pursotetaan suojaava muovikerros (kuva 33).



Kuva 33 Puristinpää (Compomec Oy)

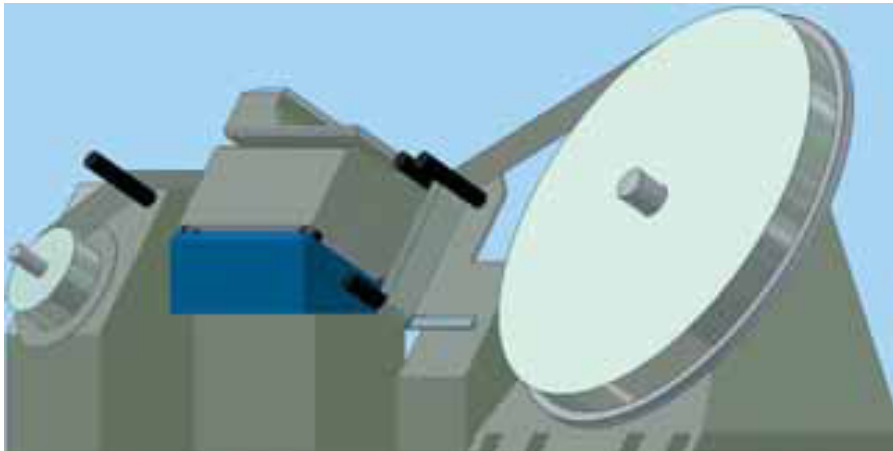
Kuvassa 33 kaapeli tulee ulos puristinpäästä. Muovi on vielä plastisessa muodossa. Seuraavaksi kaapeli kulkee vesialtaassa, missä muovi kovettuu. Valmis kaapeli kelataan vastaanottopuolaimella kaapelikelalle.

5.2 MaxiPad-konsepti

Metallinauhat toimitetaan yleensä 1,5 - 4 kilometrin pituisina, riippuen kelan halkaisijasta ja nauhan paksuudesta. Kun tehdään tätä pidempiä kaapeleita, nauhaan on tehtävä liitos. Hitsauksen suorittaminen prosessin aikana edellyttää nauhavaraajan, ylimääräisen aukirullaajan ja liitoskoneen lisäämistä kaapeliliin- jaan, mikä pidentää linjaa jopa kymmenen metriä.

Kymmenen kilometrin kaapeliin voi tulla jopa viisi liitosta. Liitoksen tekoon on rajoitettu aika, jota voidaan kasvattaa vähentämällä linjanopeutta. Nopeuden vähentäminen lisää riskiä kaapelin halkaisijan muutoksille ja vähentää tuottavuutta. Compomec on kehittänyt ratkaisun valmistaa 10 - 20 km pitkiä kaapeleita ilman online-hitsausta.

MaxiPad-konsepti sisältää yhden tai kaksi CTA 940 -nauhanaukirullaajaa, liitoskoneen ja CTA 2000 -nauhan vastaanottopuolaajan (kuva34).

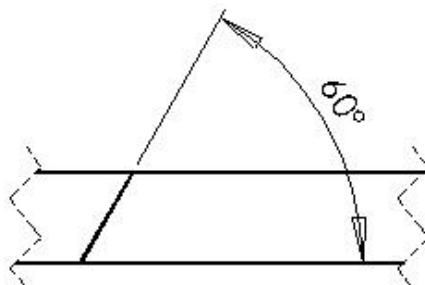


Kuva 34 MaxiPad (Compomec Oy)

Liitokset voidaan tehdä ja tarkistaa ennen kaapelin valmistusprosessia. Näin saadaan yhtämittäinen nauha, eikä liitosta tarvitse tehdä kaapelin valmistuksen yhteydessä. Lisäksi säästetään tilaa, koska kaapelilinjaan tarvitaan vain yksi CTA 2000 -aukirullaaja, jonka 2 000 mm:n kelaan mahtuu 10 - 20 km nauhaa, paksuudeltaan 0,3 – 0,1 mm. (Compomec Oy)

5.3 Liitosprosessi

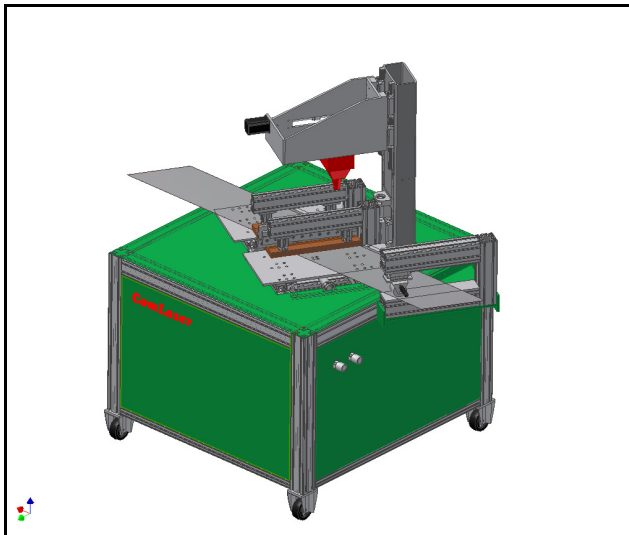
Liitos tehdään laserhitsauksella 60 asteen kulmassa päittäisliitoksena ilman il-maväliä. (kuva 35).



Kuva 35 Nauhan liitos

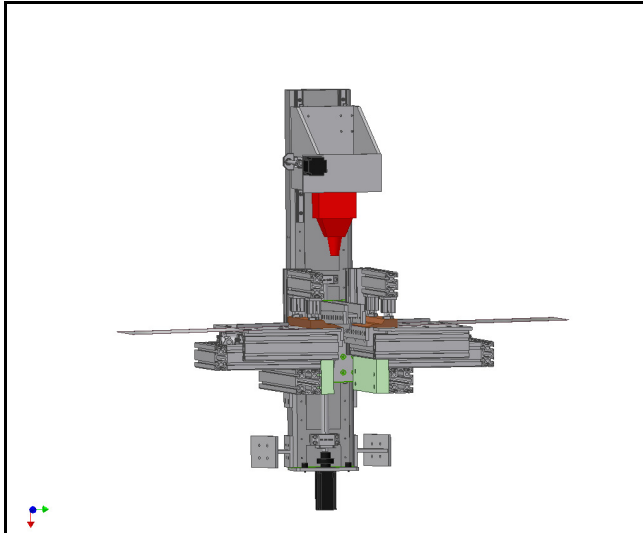
Liitos tehdään kulmassa, koska silloin saadaan hitsiin lisää pinta-alaa. Pinta-alan kasvattaminen vähentää hitsiin kohdistuvaa normaalijännitystä nauhaa vedettäessä. Kulmaksi on valittu 60 astetta. Kyseisellä kulmalla on saatu kompromissi hitsin pinta-alan ja liitoksen pituuden välillä. Kun liitos on kulmassa, ei hitsausseama tule yhteen kohtaan kaapelin ympärille, kun nauha taivutetaan putkeksi.

Olin kesällä 2008 Compomec Oy:ssä projektiharjoittelussa. Tehtävänä oli laserhitsauskoneen esisuunnittelu. Kuvassa 36 on 3D-malli suunnitteilla olevasta laserhitsauskoneesta.



Kuva 36 ComLaser -laserhitsauskone (Compomec Oy)

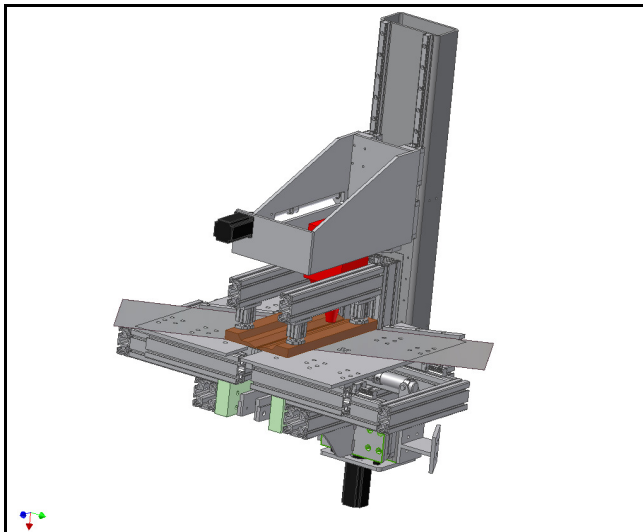
Kuvassa 36 olevasta hitsauskoneesta puuttuvat hitsausprosessin säteilysuojat ja hitsauskaasuimurit. Hitsauskone on varustettu pyörillä, joten se voidaan tarvittaessa siirtää toiseen kaapelilinjaan. Kuvissa 37 ja 38 on esitetty leikkaus- ja hitsausmekanismit ilman suojapeltejä ja runkoa.



Kuva 37. Nauhan leikkaus (Compomec Oy)

Kuvassa 37 on esitetty liitettävien nauhojen katkaisu. Liitoksessa operaattori asettaa nauhat vastetta vasten ja kiinnittää nauhat pneumaattisella painimella. Leikkausterät on kiinnitetty pystysuunnassa liikkuvaan palkkiin, ja ne leikkaavat nauhojen päät poikki.

Kuvassa 38 on esitetty hitsausprosessi.



Kuva 38. Nauhan hitsaus (Compomec Oy)

Leikkauspalkki ajetaan ala-asentoon, jolloin hitsausyksikkö laskeutuu oikeaan korkeuteen hitsausta varten. Nauhan päät asetetaan vastakkain ilman ilmaväliä ja lukitaan paikalleen. Hitsaus suoritetaan liikuttamalla hitsauspäättä liitoksen

suunnassa. Hitsauspää on kuvassa näkyvä punainen osa. Hitsaus suoritetaan ilman lisäainetta. Nauhanpainimet vapautetaan ja liitos on valmis.

5.4 Hitsattavat materiaalit

Hitsattavien materiaalin ainevahvuudet vaihtelevat 0,1 - 0,3 mm:n ja nauhan leveydet 10 - 600 mm:n välillä. Seuraavat nauhat ovat Wuxi Quantontong Cable Material Co., Ltd nimisen yrityksen tuoteluettelosta. Kyseisiä valmistajan nauhoja on tarkoitus käyttää koehitsauksissa. Kupari-, alumiini ja teräsnauhan esitteet ovat liitteenä (liite 1).

Kuparinauhan ainevahvuudet ovat 0,15 ja 0,20 mm. Nauha voi olla pinnoittamaton tai pinnoitettu yhdeltä puolelta tai molemmin puolin. Pinnoitteena käytetään esimerkiksi PET-, EAA-muovia (ethylene-acrylic acid). Pinnoitteen paksuus on 0.058 mm. Kuparin tyyppi on T2 ja sen toimitustila on Soft M. Materiaalin vetolujuus on 205 - 240 MPa(N/mm²).

Kromipinnoitettu teräsnauha on pinnoitettu yhdeltä puolelta tai molemmin puolin. Ainevahvuudet ovat 0,155 tai 0,200 mm. Pinnoitteena käytetään esimerkiksi PET-, PE -, tai EAA - muoveja. Pinnoitteen paksuus on 0,058 mm. Materiaali on matalahiilistä terästä. Se on lämpökäsitelty T-1 – T-3 -tilaan muovauksen helpottamiseksi. Materiaalin vetolujuus on 310 - 390 MPa.

Alumiininauha on pinnoitettu yhdeltä puolelta tai molemmin puolin. Ainevahvuudet ovat 0,150 ja 0,200 mm. Pinnoitteena käytetään esimerkiksi PET-, EAA-, tai PE- muovia. Pinnoitteen paksuus on 0,058 mm. Materiaalin tyyppi on 1145 tai 8011 ja toimitustila 0. Materiaalin vetolujuus on 70 - 120 MPa.

6 HITSAUKSELTA VAADITTAVAT OMINAISUUDET

Liitokselta vaadittavat ominaisuudet riippuvat suuresti kaapelin käyttötarkoituksesta. Joissakin sovelluksissa nauha voidaan liittää limiliitoksella, TIG- tai vastushitsauksella. Mikäli nauha toimii mekaanisena suojana, se täytyy liittää päittäisliitoksena. Tässä työssä käsitellään vain laserhitsattua päittäisliitosta. Pitkitäisnauhoituksen vaatimuksista ei ole standardia. Kaapeleilta vaadittavat ominaisuudet vaihtelevat maakohtaisesti. Seuraavassa kappaleessa esitetyt liitoksen ominaisuudet ovat Compomec Oy:n määrittelemiä.

Liitokselta vaadittavat ominaisuudet

Liitoksen on kestettävä nauhaan kohdistuva veto. Liitetyn nauhan lujuuden täytyy olla vähintään 80 % liittämättömän nauhan lujuudesta. Liitoksen täytyy johtaa sähköä. Nauhan toimiessa häiriösuojana, täytyy koko kaapelin vaipan olla sähköisessä yhteydessä. Joissakin tapauksissa liitoksen on oltava myös vesitiivis, esimerkiksi vedenalaisissa kaapeleissa. Hitsaussauman on kestettävä nauhan taivutus putkeksi, joten hitsi ei saa olla juurikaan aineenvahvuutta paksumpi. Hitsi ei saa jäädä reunoista vajaaksi, koska nauhan reunassa oleva lovi voi tarttua puristinpään reunoihin, jolloin nauha rikkoutuu. (Compomec Oy)

7 TOIMITTAJAN VALINTA

Etsin toimittajia netistä sekä lähteenä käytetyistä kirjoista ja ammattilehdistä. Lähetin potentiaalisille toimittajille sähköpostitse tiedustelun. Sähköpostiviestit, suomen- ja englanninkieliset ovat liitteenä (liitteet 2 ja 3). Sähköpostin liitteenä on lähetetty kupari-, alumiini- ja teräsnauhojen tuote-esitteet. Esitteet ovat Wuxi Quantontong Cable Material Co., Ltd:n yrityksen tuoteluettelosta. Compomec on ollut aiemmin yhteydessä Apricon Oy:n kanssa nauhan liittämiseen liittyen. Lähetin tiedustelun 11 yritykseen. Kuusi yritystä vastasi tiedusteluun. Näistä neljä oli kiinnostunut suorittamaan koehitsauksia.

7.1 Koehitsaukset

Lähetin koehitsaukseen alumiini-, kupari- ja teräsnauhoja, jokaista kolme kappaletta. Nauhat ovat 300 mm pitkiä, jotka on katkaistu keskeltä 30°:n kulmassa. Pituus on valittu siten, että kappaleille voidaan suorittaa vetokoe. Laitoin mukaan myös ylimääräistä materiaalia hitsausparametrien selvittämistä varten (kuva 39).



Kuva 39 Koehitsattavat nauhat

Kuparinauhat ovat pinnoittamattomia. Nauhan leveys on 28 mm ja aineenvahvuus on 0,1 mm. Alumiininauha on pinnoitettu molemmin puolin polyeteenillä. Nauhan leveys on 32 mm ja aineenvahvuus on 0,2 mm pinnoitteen kanssa. Teräsnauha on pinnoitettu molemmin puolin polyeteenillä. Nauhan leveys on 38 mm ja aineenvahvuus on 0,2 mm pinnoitteen kanssa. Leikatut nauhat on numeroitu, millä varmistetaan liitettävien pintojen sopivuus toisiinsa. Lähetin 19.2.2010 nauhoja seuraaviin yrityksiin: Kilt Oy, Lumics GmbH, Corelase Oy ja Industrial Laser Systems LLC.

7.2 Koehitsausten tulokset

Industrial Laser Systems LLC palautti koehitsaukset 18.3.2010. Nauhoihin oli suoritettu päällehitsaus. James McDowellin mukaan he eivät saaneet nauhoja kiinnitettyä siten, että päittäisliitos pystytään suorittamaan. Lumics GmbH pa-

lautti koenauhat 31.3.2010, he eivät myöskään onnistuneet hitsaamaan päittäisliitosta. Kilt Oy:lle laitoin tiedustelun 12.4.2010 koehitsausten edistymisestä. Koehitsaukset luvattiin huhtikuun loppuun mennessä. 23.5.2010 mennessä koehitsauksia ei ole saatu suoritettua. Corelase Oy:n Eero Laitinen tuli 20.5.2010 Compomec Oy:n esittelemään koehitsauksia. Hitsaukset oli suoritettu päittäisliitoksena. Corelase Oy:n koehitsauksista on kerrottu tarkemmin luvussa 8.1.

8 VALITTU TOIMITTAJA

Compomec Oy on päättänyt jatkaa nauhanliitoksen laserhitsauksen kehitystyötä Corelase Oy:n kanssa. Corelase Oy on luvannut teknisen tuen laserhitsauksen osalta pilottiprojektiin. Pilottiprojekti on tarkoitus toteuttaa kotimaisen kaapelitehtaan kanssa, joten Corelase Oy:n kotimaisuus on eduksi. Lisäksi Corelase Oy:n edustamilla Rofin-lasereilla on maailman laajuinen huoltoverkosto.

8.1 Corelase Oy:n koehitsaukset

Nauhat olivat vaurioituneet kuljetuksessa, joten vetokokeeseen soveltuvia kapaleita ei pystytty valmistamaan. Käytetty laser on Rofin StarPulse 150 (kuva 40).



Kuva 40 Star Pulse 150 (Rofin)

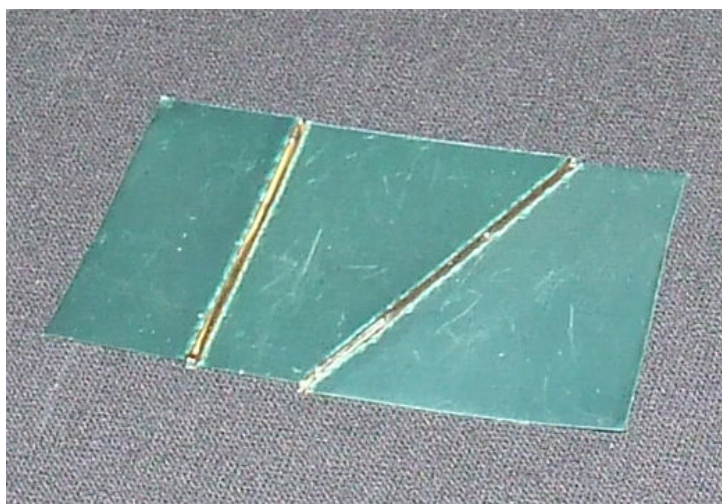
Star Pulse 150 on 150 W:n tehoinen pulssitettu Nd:YAG-laser. Koehitsauksissa käytetty aallonpituus oli 1064 nm. Suojakaasuna käytettiin argonia. Koehitsaukset tehtiin Rofinin sovelluslaboratoriossa Saksassa. Ongelmana on ollut saada liitettävät pinnat kohdistettua toisiinsa ilman ilmaväliä. Seuraavassa on esitetty ne koehitsauksissa käytetyt prosessiparametrit, jotka Corelase Oy on antanut käyttöön. Parametrit ovat Rofinin testiraportista (liite 4) ja Eero Laitisen kanssa 24.5.2010 käydystä puhelinkeskustelusta.

8.1.1 Teräsnauha

Teräsnauha on hitsattu seuraavilla prosessiparametreilla:

Keskimääräinen teho	90 W
Huipputeho	6 kW
Hitsausnopeus	11,5 mm/s
Polttoväli	120 mm

Työskentelypiste on ollut 2 mm polttopisteen yläpuolella. Kuvassa 41 on teräsnauhan koehitsaus.



Kuva 41 Teräsnauhan koehitsaus

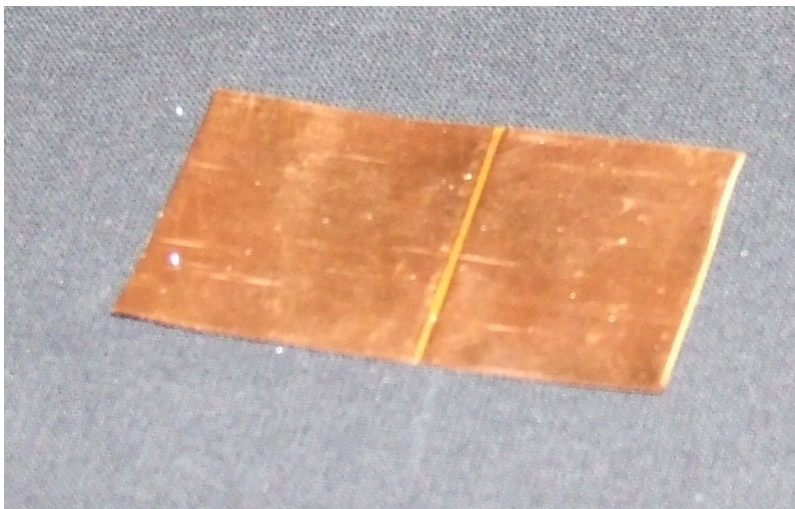
Hitsaus on palanut läpi muutamasta kohtaa, johtuen ilmavälin vaihtelusta. Muuten hitsi on siisti ja tasainen molemmin puolin. Pinnoite on palanut noin 1 mm etäisyydeltä saumasta.

8.1.2 Kuparinauha

Kuparinauha on hitsattu seuraavilla prosessiparametreilla:

Keskimääräinen teho	100 W
Huipputeho	2 kW
Hitsausnopeus	2 mm/s
Polttoväli	60 mm

Kuparinauha on hitsattu ilman suojakaasua. Kuvassa 42 on kuparinauhan koehitsaus.



Kuva 42 Kuparinauhan koehitsaus

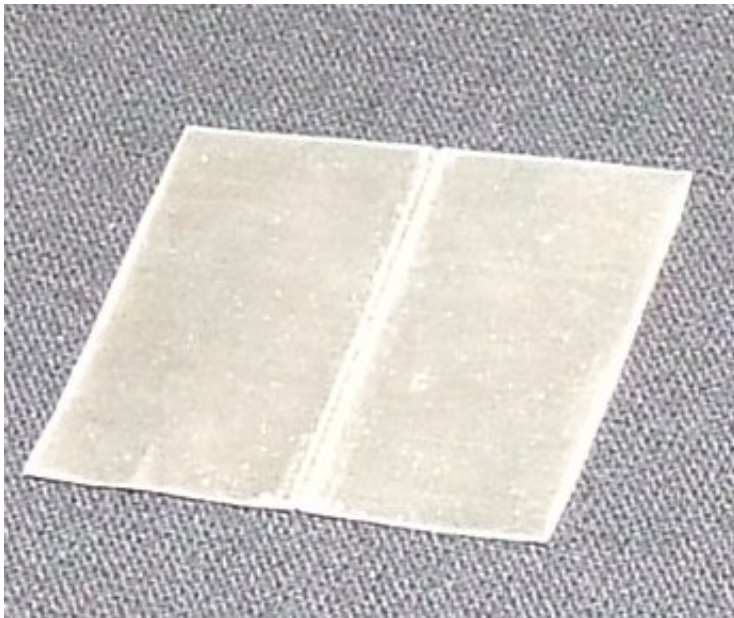
Kuparin hitsaus oli onnistunut erittäin hyvin, sauma on tasainen molemmin puolin, eikä läpipalamista ole tapahtunut. Johtuen kuparin heikosta absorptiosta Nd:YAG- laserin aallonpituudella, kuten luvun 3.1 kuvasta 6 nähtiin, on hitsausnopeus huomattavasti hitaampi kuin teräksellä ja alumiinilla.

8.1.3 Alumiininauha

Alumiininauha on hitsattu seuraavilla prosessiparametreilla:

Keskimääräinen teho	63 W
Huipputeho	1,8 kW
Hitsausnopeus	10 mm/s
Polttoväli	60 mm

Kuvassa 43 on alumiininauhan koehitsaus.



Kuva 43 Alumiininauhan koehitsaus

Hitsi on siisti ja tasainen molemmin puolin. Pinnoite on palanut noin 1 mm etäisyydeltä saumasta.

8.2 Koehitsaus laserleikatuilla nauhoilla

Corelase Oy:n Eero Laitinen suositteli nauhan liitospintojen leikkaamista laserilla. Laserleikkauksella saadaan laadultaan paremmat ja tarkemmat railon reunat. Seuraavat koehitsaukset suoritettiin laserleikatuilla nauhoilla. Nauhat oli hitsattu 90 °:n kulmassa, koska Rofinin sovelluslaboratoriossa ei ollut sopivia

kiinnittimiä hitsauksen suorittamiseen 30°:n kulmassa. Näistä koehitsauksista ei saatu testiraporttia.

9 KOEHITSAUSTEN TESTAUS

Koehitsauksille tehtiin vetokoe. Vastaavat kokeet suoritettiin liittämättömille nauhoille. Vetokokeet suoritettiin Saimaan ammattikorkeakoulun konelaboratoriossa Olli Orkamaan avustuksella. Vetokokeessa käytettiin Matertest FMT – ST-laitetta. Vetokokeissa käytettiin nauhojen nimellisdimensioita, minkä takia liittämättömien nauhojen lujuudet eroavat valmistajan ilmoittamista. Asialla ei ole kuitenkaan käytännön merkitystä, tärkeintä oli verrata liittämättömän nauhan lujuutta liitetyn nauhan lujuuteen. Vetokokeen tulokset ovat liitteenä (liite 5).

9.1 Alumiininauhojen vetokoe

Vetokoe suoritettiin kolmelle 90°:n kulmassa hitsatulle alumiininauhalle (kuva 44).



Kuva 44 Liitetty alumiininauhat vetokokeeseen

Kuvassa 44 nauhassa 1 oli onnistunein liitos. Nauhassa 2 liitetty nauhat eivät olleet aivan yhdensuuntaiset. Nauhassa 3 nauhojen reunoissa oli noin 1mm:n pykälä.

Liittämättömien nauhojen vetolujuus oli 101,4 – 104,8 N/mm². Liitetyn nauhan 1 vetolujuus oli 93,3 N/mm², liitetyn nauhan 2 vetolujuus oli 85,8 N/mm² ja liitetyn nauhan 3 vetolujuus oli 86,7 N/mm². Kaikki nauhat repesivät hitsaussauman vierestä. Kun verrataan lujinta liittämätöntä nauhaa heikoimpaan liitettyyn nauhaan, saadaan liitetyn nauhan kestävyudeksi liittämättömään verrattuna 82 %.

9.2 Kuparinauhojen vetokoe

Vetokoe suoritettiin kahdelle 90 °:n kulmassa hitsatulle Kuparinauhalle (kuva 45).



Kuva 45 Liitetyt kuparinauhat vetokokeeseen

Kuvassa 45 nauhassa 1 nauhojen reunoissa oli noin 0,5 mm:n pykälä ja toinen reuna oli jäänyt vajaaksi. Nauhassa 2 reunat olivat jääneet vajaaksi, toinen noin 2mm. Nauhassa 3 nauhojen reunoissa oli n. 1mm:n pykälä ja nauha oli muita lyhyempi.

Kuparinauhalle tehtiin vain neljä vetokoetta, kaksi nauhoista oli liian lyhyitä luotettavaan kiinnitykseen. Liittämättömien nauhojen vetolujuuksiksi saatiin 164,5 ja 166,6 N/mm². Liitettyjen nauhojen vetolujuuksiksi saatiin 123,7 ja 125,1 N/mm².

Kaikki nauhat repesivät hitsaussauman vierestä. Kun verrataan lujinta liittämättöntä nauhaa heikoimpaan liitettyyn nauhaan, saadaan liitetyn nauhan kestävyudeksi liittämättömään verrattuna 75 %.

9.3 Teräsnauhojen vetokoe

Vetokoe suoritettiin kolmelle 90 °:n kulmassa hitsatulle teräsnauhalle (kuva 46).



Kuva 46 Liitetyt teräsnauhat vetokokeeseen

Kuvassa 46 nauhassa 1 nauhojen reunat olivat jääneet vajaiksi. Nauhassa 2 oli toinen reuna jäänyt vajaaksi. Nauhassa 3 nauhojen reunoissa oli noin 1 mm:n pykälä ja toinen reuna oli jäänyt vajaaksi.

Liittämättömien nauhojen vetolujuus oli 382,9 – 384,5 N/mm². Liitetyn nauhan 1 vetolujuus oli 331 N/mm², liitetyn nauhan 2 vetolujuus oli 372,8 N/mm² ja liitetyn nauhan 3 vetolujuus oli 362,7 N/mm². Kaikki nauhat repesivät hitsaussauman vierestä. Kun verrataan lujinta liittämättöntä nauhaa heikoimpaan liitettyyn nauhaan, saadaan liitetyn nauhan kestävyudeksi liittämättömään verrattuna 86 %.

9.4 Vetokokeiden yhteenveto

Koska vedettyjen nauhojen lukumäärä oli suhteellisen pieni, ovat tulokset suuntaa-antavia. Lujuudessa päästiin kuparia lukuun ottamatta asetteluihin arvoihin. Tarkkailemalla nauhan repeämistä vedon aikana, huomattiin nauhan katkeamisen alkavan hitsin päissä olevista koloista. Vajaat hitsit lisäävät myös nauhan repeämisen riskiä muotoiluvaiheessa. Tästä johtuen ovat hitsien aloitus ja lopetuskohdat erittäin tärkeässä asemassa.

Kuparia lukuun ottamatta päästiin tavoiteltuun 80 % lujuuteen liittämättömään nauhaan verrattuna. Kun nauha liitetään 30°:n kulmassa saadaan hitsille lisää pinta-alaa, jolloin sen lujuus kasvaa.

10 PÄÄTELMÄT

Teoriaan tutustuminen ennen tiedustelujen suorittamista helpotti toimittajien esittämiin kysymyksiin vastaamista. Tietoa eri materiaalien hitsattavuudesta erityyppisille lasereille oli vaikea löytää. Tämän takia päädyttiin kysymään toimittajilta laserhitsaussovellusta ilmoitetuille materiaaleille. Lähtötiedot olivat osittain puutteelliset. Nauhavalmistajan esitteissä materiaalien koostumusta ei ole ilmoitettu kovin tarkkaan. Nauhanliitokselle ei ole olemassa standardia. Tästä johtuen Compomec Oy määritteli omat vaatimuksensa liitokselle.

Laserhitsaus mekaanisesti leikatuille nauhoille tiedettiin haasteelliseksi teoriaan perehtymisen jälkeen. Myös nauhan hitsauskiinnittimen puuttumisen tiedettiin voivan aiheuttaa ongelmia. Tilanne oli ristiriitainen, hitsauskiinnittimiä ei haluttu valmistaa ennen kuin tiedetään, onnistuuko nauhojen liittäminen laserhitsauksella. Koehitsaukset onnistuttiin tekemään vain 90°:n kulmaan leikatuille nauhoille.

Kiinnittimien puuttumisesta ja mekaanisen leikkauksen vaatimuksesta johtuen ei onnistuneita koehitsauksia saatu kuin yhdeltä toimittajalta. Ensimmäisten koehitsausten jälkeen havaittiin, että laserleikatuilla nauhoilla voidaan saada laadul-

taan parempia liitoksia. Tästä johtuen päätettiin teettää uudet koehitsaukset. Uusille koehitsauksille suoritettiin vetokokeet. Samat testaukset suoritettiin myös liittämättömille nauhoille.

Vetokokeiden tulosten perusteella voidaan todeta laserhitsauksen soveltuvan nauhan liittämiseen. Vetokokeissa saatiin liitettyjen nauhojen lujuudeksi liittämättömään verrattuna seuraavat tulokset: alumiininauha 82 %, kuparinauha 75 % ja teräsnauha 86 %. Kuparia lukuun ottamatta päästiin tavoiteltuun 80 % lujuuteen liittämättömään nauhaan verrattuna. Kun nauha liitetään 30°:n kulmassa, saadaan hitsille lisää pinta-alaa, jolloin sen lujuus kasvaa. Compomec Oy on testannut myös Tig-hitsattua alumiininauhaa. Nauha on liitetty 30°:n kulmassa. Hitsi on ollut parhaimmillaan vahvempi kuin perusaine.

Huomattiin myös hitsien repeämisen alkavan hitsin alussa ja lopussa olevista virheistä. Virheet voivat aiheuttaa myös nauhan repeämisen muotoiluvaiheessa. Tästä johtuen ovat hitsien aloitus- ja lopetuskohdat erittäin tärkeässä asemassa.

Mielestäni toimittajan kartoitus onnistui hyvin ottaen huomioon lähtötiedot. Opinnäytetyön aloituspalaveri viivästyi noin kuukauden Mika Aunolan ulkomaan matkan takia. Myös Compomec Oy:n neuvottelut pilottiasiakkaan kanssa etenevät, joten toiseen kyselykierrokseen ei ollut aikaa. Compomec Oy aikoo jatkaa yhteistyötä Corelase Oy:n kanssa.

KUVAT

Kuva 1 Liittämismenetelmät (Lukkari 1997s.15) s. 7

Kuva 2 Sulahitsausprosessit (Lukkari 1997 s.21) s.8

Kuva 3 Laseroinnin periaate (Kujanpää ym. 2005 s. 35) (alkuperäinen lähde Dawes 1992) s.9

Kuva 4 Laservalon ominaisuuksia (LaserCo) s.10

Kuva 5 Laserprosessin energiatase (Kujanpää ym. 2005 s. 43) (alkuperäinen lähde Hugel and Dausinger, 1995) s.11

Kuva 6 Erilaisten aallonpituuksien absorptoituminen joihinkin teknisiin materiaaleihin (Salminen <http://www.ohutlevy.com/artikkeli2.html>) s.12

Kuva 7 Laserhitsauksessa käytettäviä liitosmuotoja (Martikainen& Meuronen 1991 s. 22) s.14

Kuva 8 Avaimenreiän muodostuminen (Laser Kinetics <http://lasek.com/newsletters/index.html>) s.15

Kuva 9 Sulattava laserhitsaus (hitsaustekniikka 5 / 2003s. 32) s.16

Kuva 10 Laserhitsauksessa käytettäviä moodeja. (Salminen&Kujanpää s. 8) s.17

Kuva 11 Polttovälin vaikutus polttopisteen halkaisijaan. (Kujanpää ym. 2005 s.81) s.18

Kuva 12 Polttopisteen asema ja työtäisyys s.19

Kuva 13 Lasersäteen poikkeutus(Salminen&Kujanpää 1997 s.13) (Alkuperäinen lähde Dawes 1992) s.20

Kuva 14 CO₂- laserin resonaattori (Kujanpää ym. 2005 s. 56) s.21

Kuva 15 Nd:YAG- laserin resonaattori (Kujanpää ym. 2005 s. 59) s.22

Kuva 16 Nd: YAG- laser resonaattorien konstruktioita (Kujanpää ym .2005 s. 61) (alkuperäinen lähde Skirfors et al, 1995) s.23

Kuva 17 Diodilaserin pakan rakenne (Jansson & Salminen 2001/ Hitsaustekniikka 1/2001s.50) s.24

Kuva 18 Diodilaser pakkojen yhdistäminen (Jansson & Salminen 2001/ Hitsaustekniikka 1/2001s.51) s.25

Kuva 19 Diodilaserhitsausta teollisuus robotilla (LaserCo) s.26

Kuva 20 kuitulaser (Rofin) s.27

Kuva 21 Lasertyyppien käyttökustannukset (S.L. Ream. Icaleo 2004) s.29

Kuva 22 Hitsausnopeuden suhde materiaalin paksuuteen (Salminen <http://www.ohutlevy.com/artikkeli2.html>) s.29

Kuva 23 Laserhitsauspään optinen järjestely (Kujanpää, ym 2005 s.123) s.30

Kuva 24 Peilioptiikalla toteutettu CO₂ –laserin hitsauspää (<http://www.precitec.com/laser-welding/laser-welding-heads.html>) s.31

Kuva25 linssioptiikalla toteutettu Nd:YAG -, ja diodilaserin hitsauspää (<http://www.precitec.com/laser-welding/laser-welding-heads.html>) s.31

Kuva 26. Compomec Oy:n organisaatio vuonna 2010 s.33

Kuva 27 Valokuitukaapelin rakenne (www.nestorcables.fi 10.2.2010) s.34

Kuva 28 Nauhan aukirullaaja (Compomec Oy) s.35

Kuva 29 Nauha ja kaapeliydin (Compomec Oy) s.36

Kuva 30 Nauha muotoutuu putkeksi (Compomec Oy) s.36

Kuva 31 Muotoilutyökalu (Compomec Oy) s.37

Kuva 32 Kuumaliiman pursotus (Compomec Oy) s.37

Kuva 33 Puristinpää (Compomec Oy) s.38

Kuva 34 MaxiPad (Compomec Oy) s.39

Kuva 35 Nauhan liitos s.39

Kuva 36 ComLaser laserhitsauskone (Compomec Oy) s.40

Kuva 37. Nauhan leikkaus (Compomec Oy) s.41

Kuva 38. Nauhan hitsaus (Compomec Oy) s.41

Kuva 39 Koehitsattavat nauhat s.44

Kuva 40 Star Pulse 150 (Rofin) s.45

Kuva 41 Teräsnauhan koehitsaus s.46

Kuva 42 Kuparinauhan koehitsaus s.47

Kuva 43 Alumiininauhan koehitsaus s.48

Kuva 44 Liitetyt alumiininauhat vetokokeeseen s.49

Kuva 45 Liitetyt kuparinauhat vetokokeeseen s.50

Kuva 46 Liitetyt teräsnauhat vetokokeeseen s.51

Taulukot

Taulukko 1 Materiaalien CO₂- laserhitsattavuus (Salminen&Kujanpää 1997 s.29) s.22

Taulukko 2 Eri laserien ominaisuuksien vertailu (Salminen) s.27

Taulukko 3 Eri laserien soveltuvuus teolliseen käyttöön (Salminen) s.28

LÄHTEET

Compomec Oy kuva-arkisto

Dawes, C. 1992 Laserwelding. Abington, Woodhead Publishing Ltd

Hitsaustekniikka 5 / 2003, s 32.

Inkinen P, Manninen R& Tuohi J. 2006. Momentti 2 Insinöörifysiikka. Helsinki: Otava

Jansson A, Salminen A. Diodilaserin käyttösovellukset konepajateollisuudessa. Hitsaustekniikka 2/ 2001 s. 48-51

Kujanpää V. Salminen A. Vihinen J. 2005. Lasertyöstö. Helsinki:Teknologiainfo Teknova Oy

Laser Co <http://www.laserco.fi> luettu 15.10.2010

Laser Kinetics <http://lasek.com/newsletters/index.html> luettu 12.4.2010

(<http://www.laserco.fi>) luettu 12.4.2010

Lukkari, j. 1997. Hitsaustekniikka, perusteet ja kaarihitsaus. Helsinki: Opetushallitus

Martikainen, J. Meuronen, I.1991. Elektronisuihku- ja laserhitsauksen tuotesuunnittelulle tarjoamat mahdollisuudet. Helsinki: Metalliteollisuuden Kustannus Oy

Migliore L. Welding with Lasers
<http://www.laserk.com/newsletters/paperwelding.html> luettu 7.6.2010

Moisio, T. 1989. Lasertyöstö. Helsinki, Tekes

Nestor Cables Oy http://www.nestorcables.fi/fi/tuotteet/optiset-telekaapelit/fi_FI/fyo2pmu/ (luettu 7.6.2010)

Pessa M. 2004. Ultralyhyitä laserpulsseja. Prosessori 25. s. 30-31

Precitec <http://www.precitec.com/laser-welding/laser-welding-heads.html> luettu 21.9.2010

Rofin <http://www.rofin.com> luettu 2.4.2010

SFS-käsikirja 54 Hitsaussanasto 1996 2.painos.

Salminen A. 2006 Uudet laserhitsaustekniikat ja niiden sovellukset.
<http://www.asmfinland.fi/files/seminaariaineisto/liittaminen.html> luettu 15.9.2010

Salminen A. 2002 <http://www.ohutlevy.com/artikkeli2.html> luettu 12.4.2010

Salminen A, Kujanpää V. 1997. CO₂-laserhitsaus konepajateollisuudessa. Helsinki : Metalliteollisuuden Kustannus Oy

Venkat S. Welding with diode lasers
<http://www.thefabricator.com/article/laserwelding/welding-with-diode-lasers> (luettu 10.1.2010)

Väisänen T 2008 Hybridihitsaus diodilaserin ja kuitulaserin yhdistelmällä. Hämeen ammattikorkeakoulun e-julkaisuja.
http://portal.hamk.fi/portal/page/portal/HAMKJulkisetDokumentit/Yleisopalvelut/Julkaisupalvelut/Kirjat/tekniikka_liikenne/Hybridihitsaus_Diodilaserin_Ja_Kuitulaseri_Yhdistelmalla.pdf luettu 15.5.2010

Wuxi Quantontong Cable Material Co., Ltd tuoteluettelo 2008

Hugel, H. Dausinger, F. Interaction phenomena and energy coupling in laser treatment processes. Euro Laser Academy 1995, Kurssimoniste Module 1 Process Fundamentals Part

COPOLYMER COATED ALUMINIUM TAPE

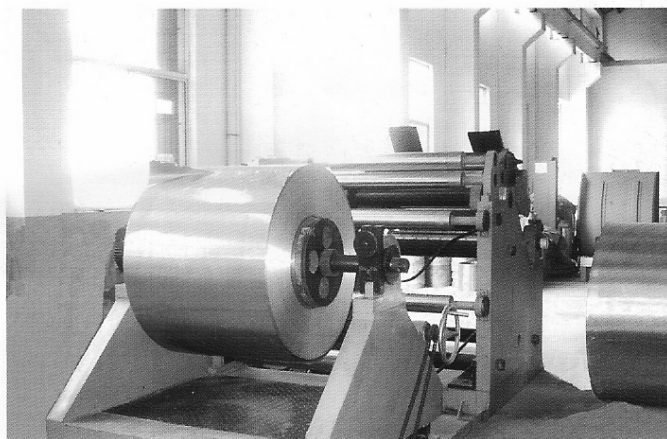
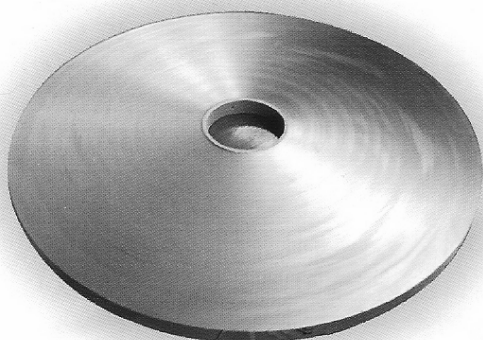
TYPE: 1145, 8011, ETC.

ALLOY STATE: O

COLOR: NATURAL COLOR OR BLUE

ITEM		UNIT	INDEX	TOLERANCE
Appearance		---	Straight, Even, Free from burrs, inclusions, moisture, dust, pinholes, creases, cuts, tear or adhesion	
Length		M	1000—4100	
Width		MM	12—900	
Thickness	Aluminium	MM	0.150 or 0.200	+/-0.010
	Side A of Coat	MM	0.058	+/-0.013
	Side B of Coat	MM	0.058	+/-0.013
	Total Thickness	MM	0.260 or 0.310	+/-0.015
Tensile Strength		MPA	70—120	
Elongation at Break		%	15—30	
Peel Strength between Al and Plastic Coating	Side A	N/CM	≥6.13	
	Side B	N/CM	≥6.13	
Heat Seal Strength		N/CM	≥17.5	
Heat Cut Strength		---	Breakage	
Water Resistance 68±1°C, 168h Peel Strength	Side A	N/CM	≥6.13	
	Side B	N/CM	≥6.13	
Filler/Floodant Resistance 68±1°C, 168h	SP	---	No Pickling or Delamination	
	WT-103	---	No Pickling or Delamination	
Dielectric Strength DC 2KV, 1min		---	No Breaking	
Corrosion Resistance 0.1mol/L, HCl, 480h		Grade	7	

OTHER PARAMETERS, SUCH AS WIDTH, LENGTH, ID AND OD WILL MEET THE CLIENTS' REQUIREMENTS.



PLASTIC COATED COPPER TAPE

Plastic clad mental combined strip consists of an aluminum tape coated on one side or both sides with an adherent ethylene copolymer(EAA/PET, etc.) either clear or color-coded green. The copper tape is used for telecommunication cable and optical cable. Mainly advantage of copper tape includes shield disturbance, anti-damp, armoured layer.

SPECIFICATIONS OF PLASTIC CLAD COPPER TAPE

TYPE: T2. ALLOY STATE: SOFT M Hv: 55—100 COLOR: NATURAL COLOR OR GREEN

ITEM		UNIT	INDEX	TOLERANCE
Appearance		---	Straight, Even, Free from burrs, inclusions, moisture, dust, pinholes, creases, cuts, tear or adhesion	
Length		M	1000—3100	
Width		MM	12—600	
Thickness	Copper	MM	0.150 or 0.200	+/-0.010
	Side A of Coat	MM	0.058	+/-0.013
	Side B of Coat	MM	0.058	+/-0.013
	Totao Thickness	MM	0.260 or 0.310	+/-0.015
Tensile Strength		MPA	205—240	
Elongation at Break		%	≥20	
Peel Strength between Copper and Plastic Coating	Side A	N/CM	≥5	
	Side B	N/CM	≥5	
Heat Seal Strength		N/CM	≥17.5	
Heat Cut Strength		---	Breakage	
WaterResistance 68+/-1°C, 168h Peel Strength	Side A	N/CM	≥5	
	Side B	N/CM	≥5	
Filler/Floodant Resistance 68+/-1°C, 168h	SP	---	No Pickling or Delamination	
	WT-103	---	No Pickling or Delamination	
Dielectric Strength DC 2KV, 1min	Double Sides	---	No Breaking	
	Single Side	---	No Breaking	
Conductivity Rate		%	99—100 98	

OTHER PARAMETERS, SUCH AS WIDTH, LENGTH, ID AND OD WILL MEET THE CLIENTS' REQUIREMENTS.

COPPER TAPE

Specifications:

Properties	Code Name: Cu	Alloy: TU2	Temper: M	Content: ≥99.90
	Thickness: 0.01mm—0.70mm			Width: 10—400mm
	Diameter: ≤450mm			Core Diameter Beased on Customers' Requirements
	Thickness Tolerance: 8%			Width Tolerance: 10%
	Surface should be smooth, shiny, without any corrosion, brown stain, fold, wrinkles etc. Edges should be straight.			
Physical Specifications	Tensile Strength(N/mm): ≥200 N/sq.mm			
	Elongation A11.3%≥22			
	Resistivity Ωmm2/m≥0.01759			

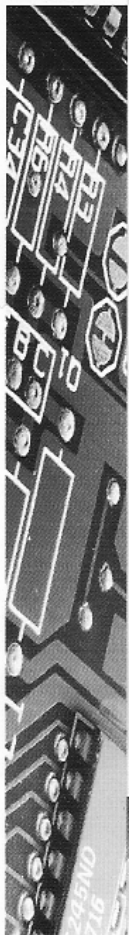
ID. OD. length. pakaging requirements should be specified when ordering.

PLASTIC COATED STEEL TAPE

Plastic clad metal consists of a chromeplated steel tape coated on one side or both sides with an adherent ethylene copolymer(EAA/PE/PET etc.) .The copolymer exhibits excellent adhesion to the steel substrate and has the chemical resistance and general characteristics of lower density polyethylene, it bonds to low, linear low, medium and high density polyethylene. The steel is low carbon, electronic chrome-coated steel tempered to T-1 to T-3 condition for excellent formability and fabrication characteristics.

COLOR: GREEN

ITEM		UNIT	INDEX	TOLERANCE
Appearance		---	Straight,Even,Free from burrs,inclusions, moisture,dust, pinholes,creases, cuts,tear or adhesion	
Length		M	1000—5000	
Width		MM	12—1100	
Thickness	Steel	MM	0.155 or 0.200	+/-0.010
	Side A of Coat	MM	0.058	+/-0.013
	Side B of Coat	MM	0.058	+/-0.013
	Total Thickness	MM	0.260 or 0.310	+/-0.015
Chromium on Steel		G/m sq	0.08—0.34	
Tensile Strength		MPA	310—390	
Elongation at Break		%	20-25	
Peel Strength between Steel and Plastic Coating	Side A	N/CM	≥6.13	
	Side B	N/CM	≥6.13	
Heat Seal Strength		N/CM	≥17.5	
Heat Cut Strength		---	Breakage	
WaterResistance68+/-1 °C, 168h Peel Strength	Side A	N/CM	≥6.13	
	Side B	N/CM	≥6.13	
Filler/Floodant Resistance 68+/-1 °C,168h	SP	---	No Pickling or Delamination	
	WT-103	---	No Pickling or Delamination	
Dielectric Strength DC 2KV,1min		---	No Breaking	
Corrosion Resistance 0.1mol/L,Hcl,480h		Grade	8	



OTHER PARAMETERS, SUCH AS WIDTH, LENGTH, ID AND OD WILL MEET THE CLIENTS' REQUIREMENTS.

Liite 2

Hei!

Olemme kehittämässä metallinauhan hitsauskonetta kaapelin valmistuksessa käytettävien nauhojen liittämiseen ja tarvitsemme siihen sopivan laserhitsaus laitteen. Hitsattavat materiaalit ovat kupari, teräs ja alumiini. Materiaalit voivat olla myös pinnoitettuja yhdeltä tai molemmilta puolilta polyeteenillä. Hitsaus on tarkoitus tehdä ilman pinnoitteen poistoa, mikäli mahdollista. Materiaalin paksuudet ovat 0,1 - 0,3mm. Nauhavalmistajan tuotetiedot ovat liitteenä. Hitsaus tehdään päittäisliitoksena, ilman lisäainetta. Nauhojen päät on tarkoitus katkaista suorateräisellä leikkauksella ja asemoida nauhojen päät niin että ne ovat vastakkain ilman ilmaväliä.

Toivomme pikaista yhteydenottoa mikäli teillä on ratkaisu tarpeisiimme.

Terveisin

Ismo Tynkkynen
ismo.tynkkynen@compomec.fi
+358 50 493 2626

Compomec Oy
Sukkulakatu 3
FI-55120 IMATRA
FINLAND
www.compomec.fi
Int.telephone +358 5 4761 888
Int.telefax +358 5 4761 877

Liite 3

Dear Sir's

We are looking for laser welding equipment for following application.

We are developing a metal tape welding machine.

Materials to be welded are copper, aluminium and mild steel. Materials could be also coated on one side or both sides with polyethylene. Welding should be able to do without removing the coating, if possible. Thicknesses of tapes are between 0, 1 and 0, 3 mm. Tape product info is attached.

Welding is to be made as butt joint, without filler material. Tape will be cut with cutting shear. Tape ends will be positioned without air cap.

Looking forward to hear from you as soon as possible

Best Regards

Ismo Tynkkynen

ismo.tynkkynen@compomec.fi

+358 50 493 2626

Compomec Oy

Sukkulakatu 3

FI-55120 IMATRA

FINLAND

www.compomec.fi

Int.telephone +358 5 4761 888

Int.telefax +358 5 4761 877

Application report welding	V-Nr:	A-Nr: A-100268	date: 23.04.2010
Application engineer: Stefan Hermann			
Task: Seam welding on Al, Cu, steel strips			
Customer: Compomec Oy		Sales: Eero Laitinen (Corelase)	

Remarks:

- Lab- fixture is not good enough to clamp the strips without gap
- Parts were deformed after the delivery so we cut the strips again for welding
- For production you have to position the parts without gap

Laser, beam delivery, beam forming

Laser	SP 150
wavelength [nm]	1064
fiber diameter [μm]	400
fiber	Optoscand QBH
imaging ratio	1:2/ 1:1
beam expander (direct beam only)	
focal length [mm]	120/ 60
theor. spot size [μm]	800/ 400

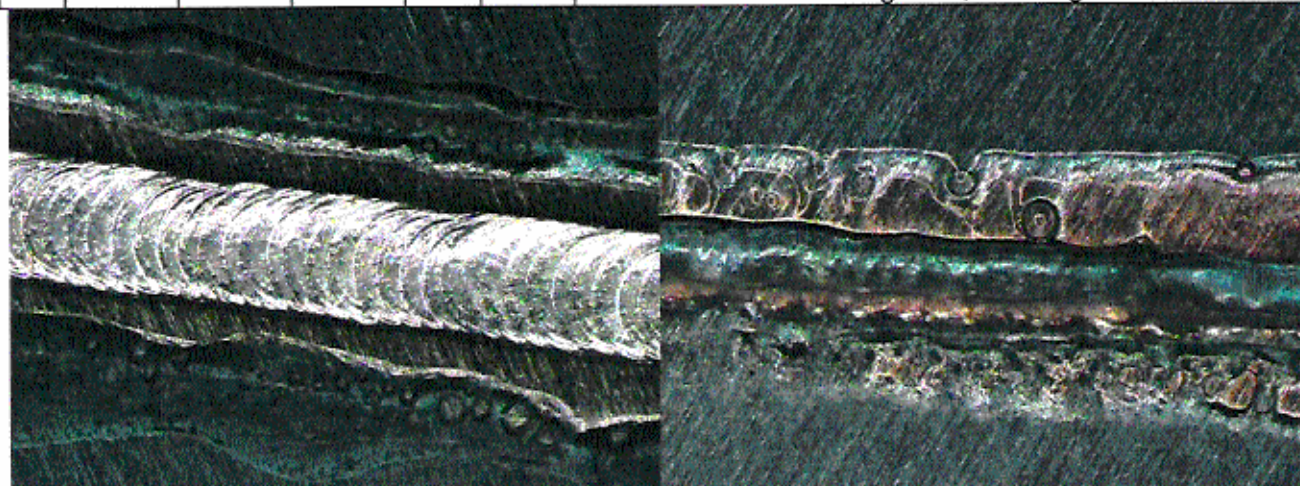
protection gas, material:

protection gas	Argon 4.8
pressure [bar]	6
flow rate [l/min]	11
nozzle	Brass Ø 8mm

material	Al, Cu, steel
thickness [mm]	
condition	

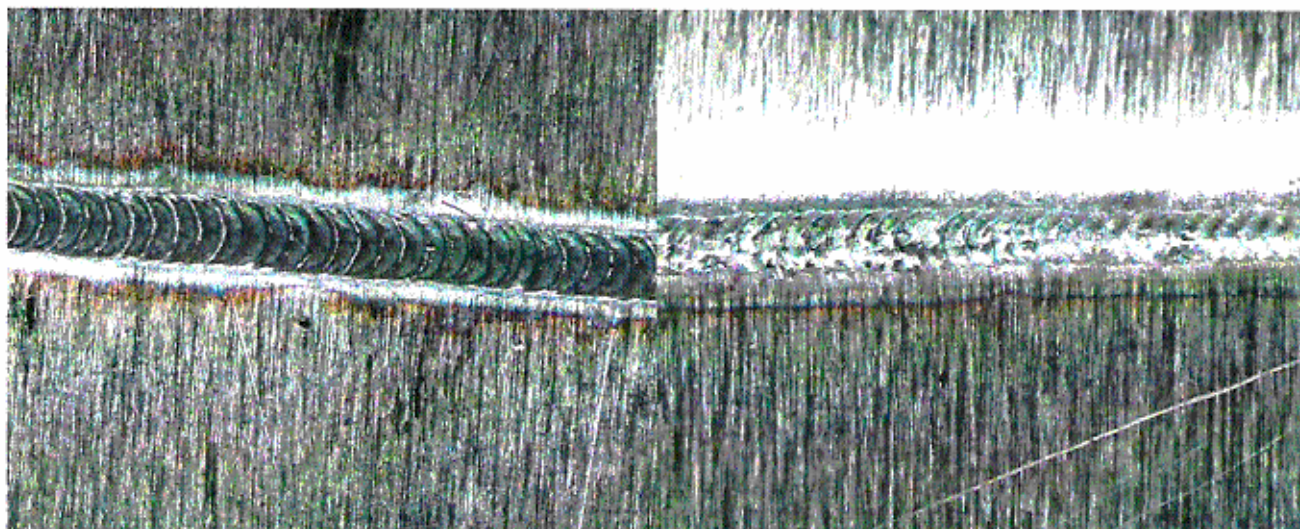
Process parameters

No.	Peak power [W]	Rep.rate [Hz]	Pulse-duration [ms]	P _{AV} [W]	speed [mm/s]	Remarks
1	6000	70			11,5	Steel/ steel with cover; Shape 0/50, 20/50, 20/100, 24/80, 100/10; focal length 120 mm; with Argon; 2 mm defocused
2	2000	27			2	Cu/ Cu; Shape 0/50, 20/50, 20/100, 24/80, 100/10; focal length 60; no Argon
3	1800	63			10	Al/ Al with cover; Shape 0/100,24/100,31/73, 100/52; focal length 60; with Argon



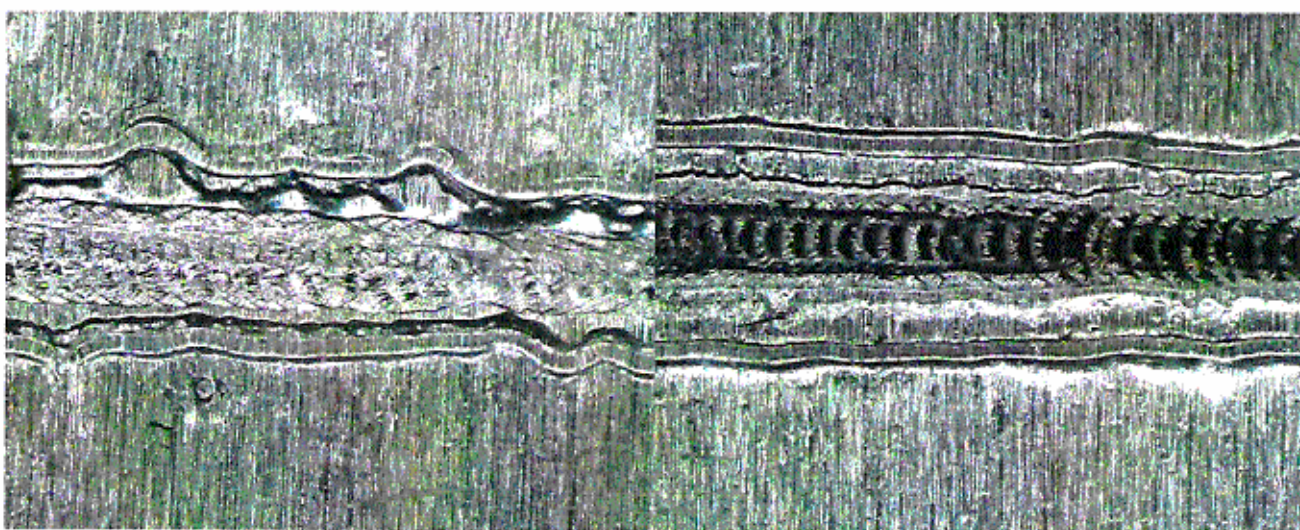
Pic.1 steel/ steel welding area

Pic.2 steel/ steel rear- side



Pic.3 Cu/ Cu welding area

Pic.4 Cu/ Cu rear- side



Pic.5 Al/ Al welding area

Pic.6 Al/ Al rear- side





Koekappaleryhmän yleiset tiedot

EKAMK

vetokoe

1

Tilaus opinäytetyöTynkkynen

Erä 1

Koestuspäivä 30.9.2010

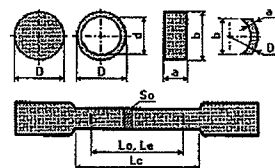
Koekappale 3

Koestaja O.O.

Huom alumiini liittämätön I

Syöttötiedot

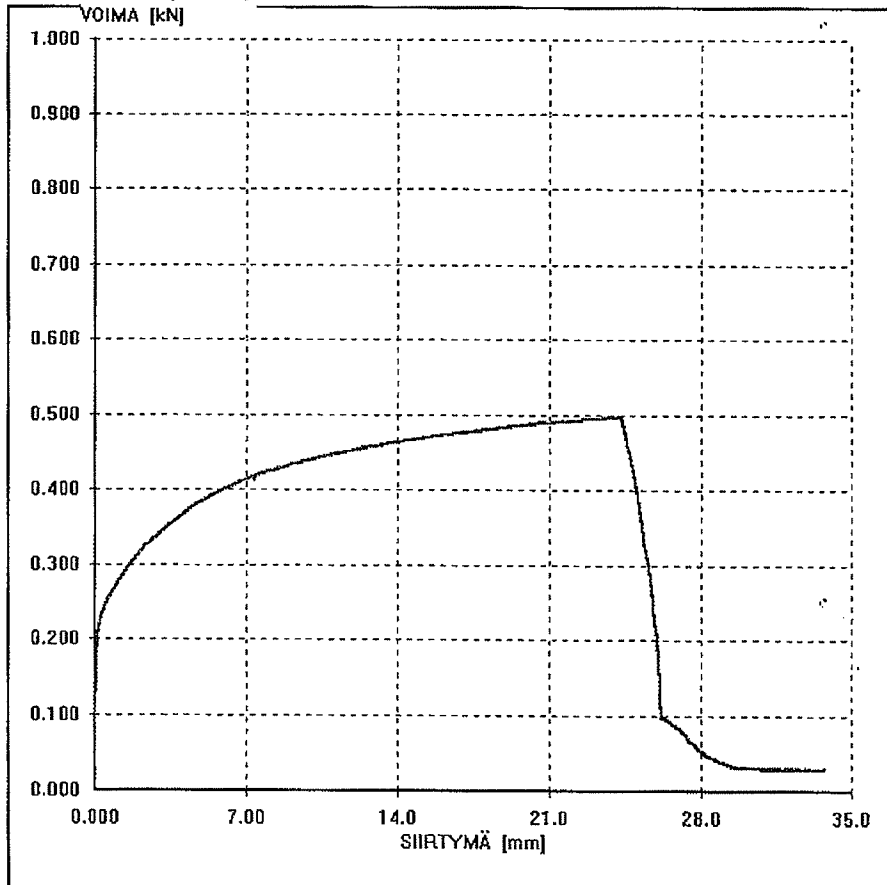
a	0,15	mm	Koepituus	Lc	0,00	mm
b	32,00	mm	Murtovenymä alkumittapituus	Lo	0,00	mm
D	10,00	mm	loppumittapituus	Lu	0,00	mm
d	0,00	mm	Venymäanturi alkumittapituus	Le	0,00	mm
Pinta-ala So	4,80	mm ²	Koekappaleen loppuhalkaisia	Du	0,00	mm



Lopputulokset

Suurin voima	Fm	0,497	kN	Kimmokerroin	E	0	10 ³ N/mm ²
Lujuus	Rm	103,5	N/mm ²	Korrelaatio		0,00	
Alempi myötöraja	ReL	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm ²
Ylempi myötöraja	ReH	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm ²
		0,000000		Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm ²
		0,000000		Koeaika		259,7	s
		0,000000		Murtovenymä	A	0,0	%
				Murtokurouma	Z	0,0	%

Kokeen mittauspistekäyrä




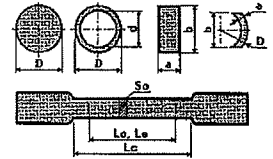


Koekappaleryhmän yleiset tiedot

EKAMK			
vetokoe			
1			
Tilaus	opinäytetyöTynkkynen		
Erä	1	Koestuspäivä	30.9.2010
Koekappale	16	Koestaja	O.O.
Huom	teräsnauha liittämätön 2		

Syöttötiedot

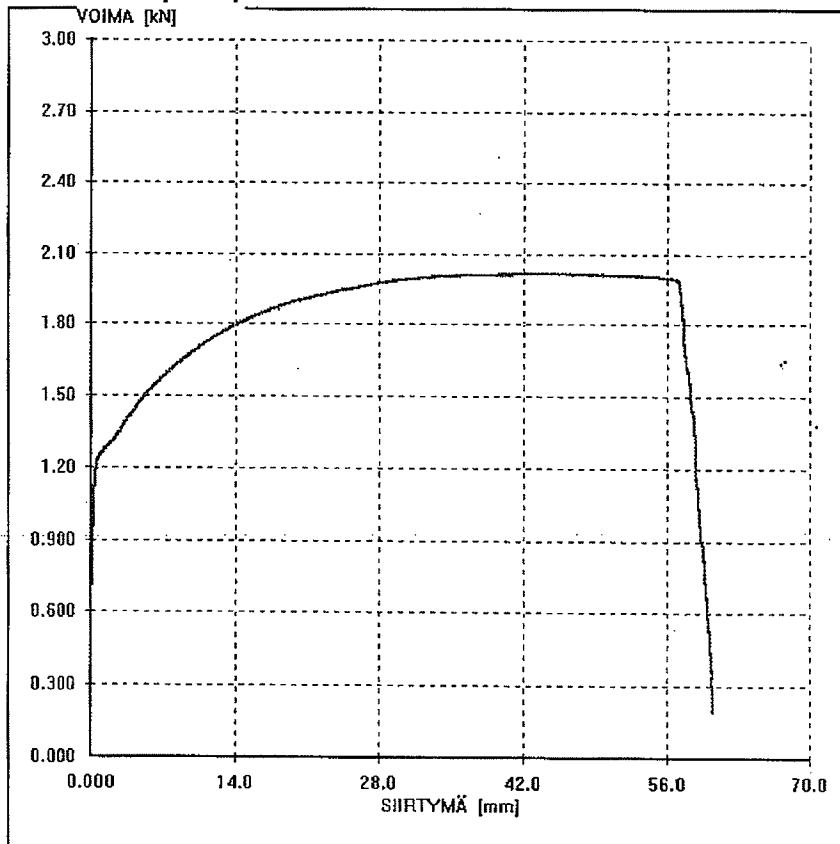
a	0,15	mm	Koepituus	Lc	0,00	mm	
b	35,00	mm	Murtovenymä alkumittapituus	Lo	0,00	mm	
D	10,00	mm	loppumittapituus	Lu	0,00	mm	
d	0,00	mm	Venymäanturi alkumittapituus	Le	0,00	mm	
Pinta-ala	So	5,25	mm ²	Koekappaleen loppuhalkaisia	Du	0,00	



Lopputulokset

Suurin voima	Fm	2,012	kN	Kimmokerroin	E	0	10 ³ N/mm ²
Lujuus	Rm	383,2	N/mm ²	Korrelaatio		0,00	
Alempi myötöraja	ReL	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 % 0,0	N/mm ²
Ylempi myötöraja	ReH	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 % 0,0	N/mm ²
		0,000000		Venymisraja	Rp	0,00 % 0,0	N/mm ²
		0,000000		Koeaika		467,0	s
		0,000000		Murtovenymä	A	0,0	%
				Murtokuruuma	Z	0,0	%

Kokeen mittauspistekäyrä





Koekappaleryhmän yleiset tiedot

EKAMK					
vetokoe					
1					
Tilaus	opinäytetyöTynkkynen				
Erä	1	Koestuspäivä		30.9.2010	
Koekappale	3	Koestaja		O.O.	
Huom	alumiini liittämätön I				

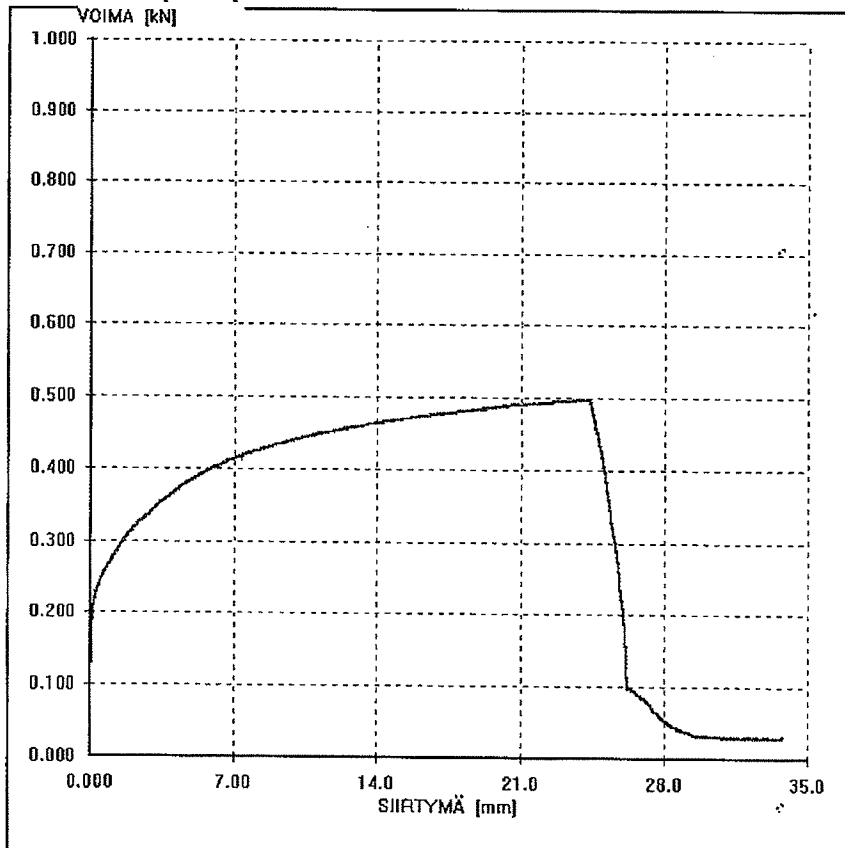
Syöttötiedot

a	0,15	mm	Koepituus	Lc	0,00	mm	
b	32,00	mm	Murtovenymä alkumittapituus	Lo	0,00	mm	
D	10,00	mm	loppumittapituus	Lu	0,00	mm	
d	0,00	mm	Venymäanturi alkumittapituus	Le	0,00	mm	
Pinta-ala	So	4,80	mm²	Koekappaleen loppuhalkaisija	Du	0,00	mm

Lopputulokset

Suurin voima	Fm	0,497	kN	Kimmokerroin	E	0	10 ³ N/mm ²
Lujuus	Rm	103,5	N/mm ²	Korrelaatio		0,00	
Alempi myötöraja	ReL	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm ²
Ylempi myötöraja	ReH	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm ²
		0,000000		Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm ²
		0,000000		Koeaika		259,7	s
		0,000000		Murtovenymä	A	0,0	%
				Murtokurouma	Z	0,0	%

Kokeen mittauspistekäyrä






Koekappaleryhmän yleiset tiedot

EKAMK					
vetokoe					
1					
Tilaus	opinäytetyöTynkkynen				
Erä	1	Koestuspäivä	30.9.2010		
Koekappale	8	Koestaja	O.O.		
Huom	alumiini liitetty3 kiinnitys erillainen				

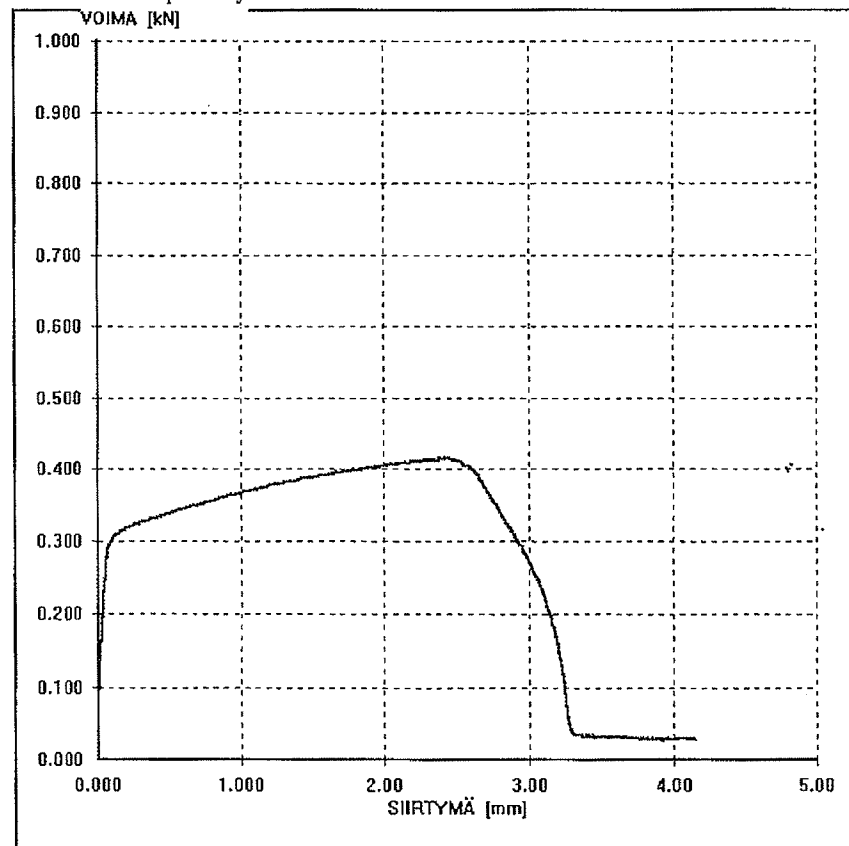
Syöttötiedot

a	0,15	mm	Koepituus	Lc	0,00	mm	
b	32,00	mm	Murtovenymä alkumittapituus	Lo	0,00	mm	
D	10,00	mm	loppumittapituus	Lu	0,00	mm	
d	0,00	mm	Venymäanturi alkumittapituus	Le	0,00	mm	
Pinta-ala	So	4,80	mm ²	Koekappaleen loppuhalkaisia	Du	0,00	

Lopputulokset

Suurin voima	Fm	0,416	kN	Kimmokerroin	E	0	10³N/mm²
Lujuus	Rm	86,7	N/mm²	Korrelaatio		0,00	
Alempi myötöraja	ReL	0,0	N/mm²	Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm²
Ylempi myötöraja	ReH	0,0	N/mm²	Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm²
		0,000000		Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm²
		0,000000		Koeaika		0,0	s
		0,000000		Murtovenymä	A	0,0	%
				Murtokurouma	Z	0,0	%

Kokeen mittauspistekäyrä






Koekappaleryhmän yleiset tiedot

EKAMK			
vetokoe			
1			
Tilaus	opinäytetyöTynkkynen		
Erä	1	Koestuspäivä	30.9.2010
Koekappale	9	Koestaja	O.O.
Huom	kupari liittämätön1		

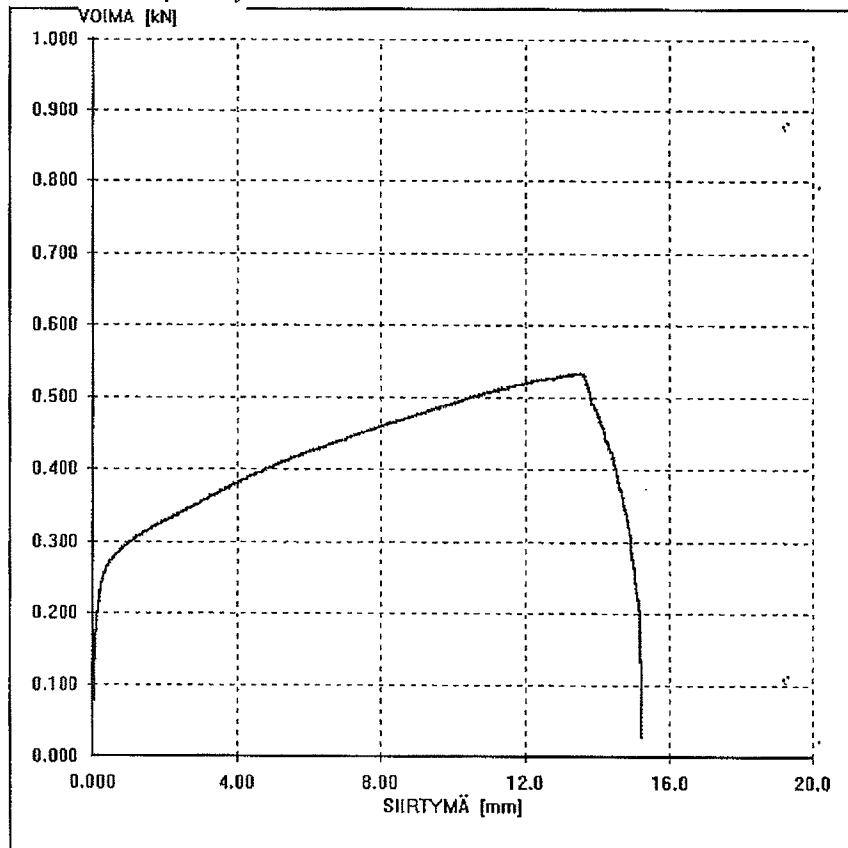
Syöttötiedot

a	0,10	mm	Koepituus	Lc	0,00	mm	
b	32,00	mm	Murtovenymä alkumittapituus	Lo	0,00	mm	
D	10,00	mm	loppumittapituus	Lu	0,00	mm	
d	0,00	mm	Venymäanturi alkumittapituus	Le	0,00	mm	
Pinta-ala	So	3,20	mm ²	Koekappaleen loppuhalkaisia	Du	0,00	mm

Lopputulokset

Suurin voima	Fm	0,533	kN	Kimmokerroin	E	0	10³N/mm²
Lujuus	Rm	166,6	N/mm²	Korrelaatio		0,00	
Alempi myötöraja	ReL	0,0	N/mm²	Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm²
Ylempi myötöraja	ReH	0,0	N/mm²	Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm²
		0,000000		Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm²
		0,000000		Koeaika		145,3	s
		0,000000		Murtovenymä	A	0,0	%
				Murtokurouma	Z	0,0	%

Kokeen mittauspistekäyrä






Koekappaleryhmän yleiset tiedot

EKAMK			
vetokoe			
1			
Tilaus	opinäytetyöTynkkynen		
Erä	1	Koestuspäivä	30.9.2010
Koekappale	12	Koestaja	O.O.
Huom	kupari liitetty1		

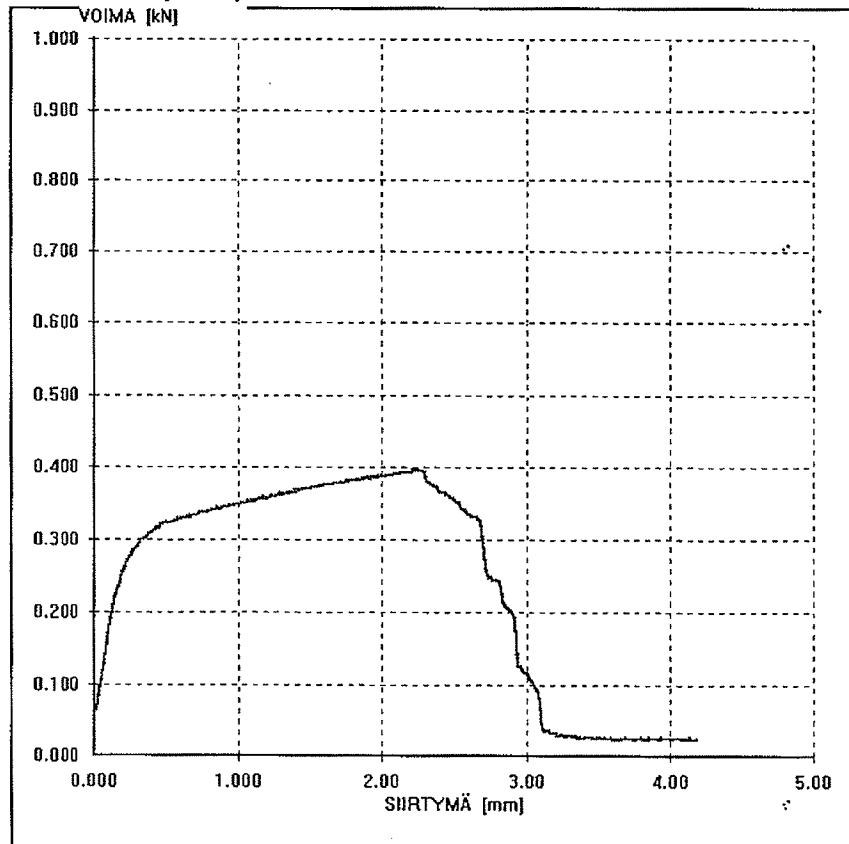
Syöttötiedot

a	0,10	mm	Koepituus	Lc	0,00	mm	
b	32,00	mm	Murtovenymä alkumittapituus	Lo	0,00	mm	
D	10,00	mm	loppumittapituus	Lu	0,00	mm	
d	0,00	mm	Venymäanturi alkumittapituus	Le	0,00	mm	
Pinta-ala	So	3,20	mm ²	Koekappaleen loppuhalkaisia	Du	0,00	

Lopputulokset

Suurin voima	Fm	0,396	kN	Kimmokerroin	E	0	10 ³ N/mm ²
Lujuus	Rm	123,7	N/mm ²	Korrelaatio		0,00	
Alempi myötöraja	ReL	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm ²
Ylempi myötöraja	ReH	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm ²
		0,000000		Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm ²
		0,000000		Koeaika		0,0	s
		0,000000		Murtovenymä	A	0,0	%
				Murtokurouma	Z	0,0	%

Kokeen mittauspistekäyrä





Koekappaleryhmän yleiset tiedot

EKAMK					
vetokoe					
1					
Tilaus	opinäytetyöTynkkynen				
Erä	1	Koestuspäivä	30.9.2010		
Koekappale	4	Koestaja	O.O.		
Huom	alumiini liittämätön2				

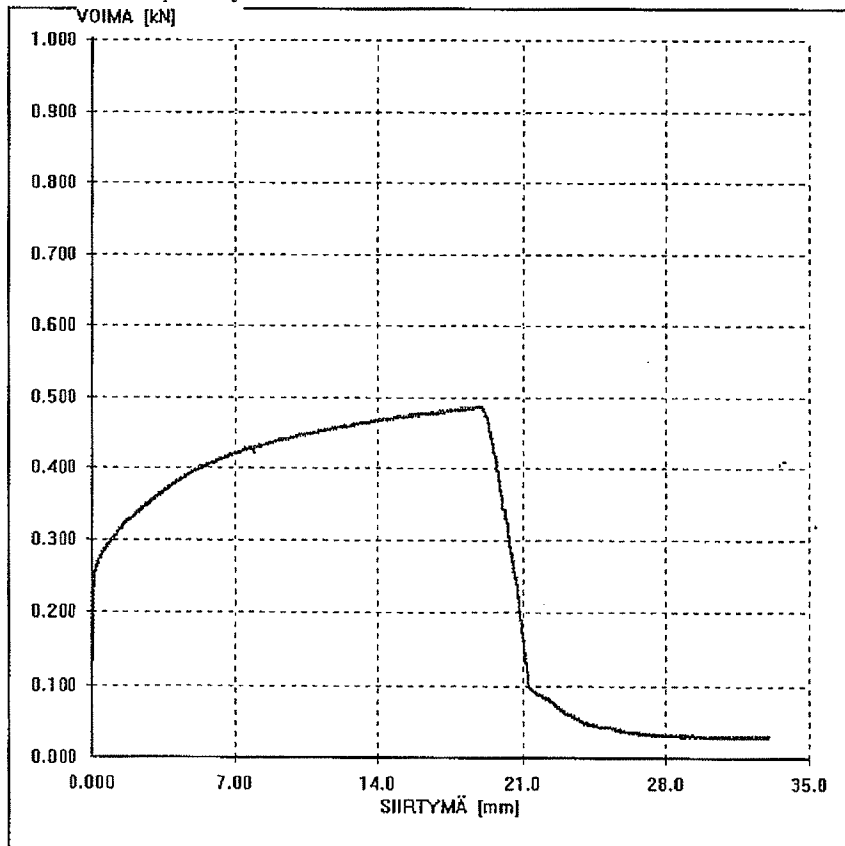
Syöttötiedot

a	0,15	mm	Koepituus	Lc	0,00	mm	<p>The technical drawing illustrates a tensile specimen with various dimensions labeled. It includes a circular cross-section with diameter 'D', a reduced section with diameter 'd', and a central gauge length 'Lc'. Other dimensions shown are 'a' (thickness), 'b' (width), 'So' (total length), 'Le' (grip length), and 'Du' (hole diameter).</p>
b	32,00	mm	Murtovenymä alkumittapituus	Lo	0,00	mm	
D	10,00	mm	loppumittapituus	Lu	0,00	mm	
d	0,00	mm	Venymäanturi alkumittapituus	Le	0,00	mm	
Pinta-ala	So	4,80	mm ²	Koekappaleen loppuhalkaisia	Du	0,00	

Lopputulokset

Suurin voima	Fm	0,487	kN	Kimmokerroin	E	0	10³N/mm²
Lujuus	Rm	101,4	N/mm²	Korrelaatio		0,00	
Alempi myötöraja	ReL	0,0	N/mm²	Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm²
Ylempi myötöraja	ReH	0,0	N/mm²	Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm²
		0,000000		Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm²
		0,000000		Kocaika		0,0	s
		0,000000		Murtovenymä	A	0,0	%
				Murtokurouma	Z	0,0	%

Kokeen mittauspistekäyrä





Koekappaleryhmän yleiset tiedot

EKAMK			
vetokoe			
1			
Tilaus	opinäytetyöTynkkynen		
Erä	1	Koestuspäivä	30.9.2010
Koekappale	13	Koestaja	O.O.
Huom	kupari liitetty2		

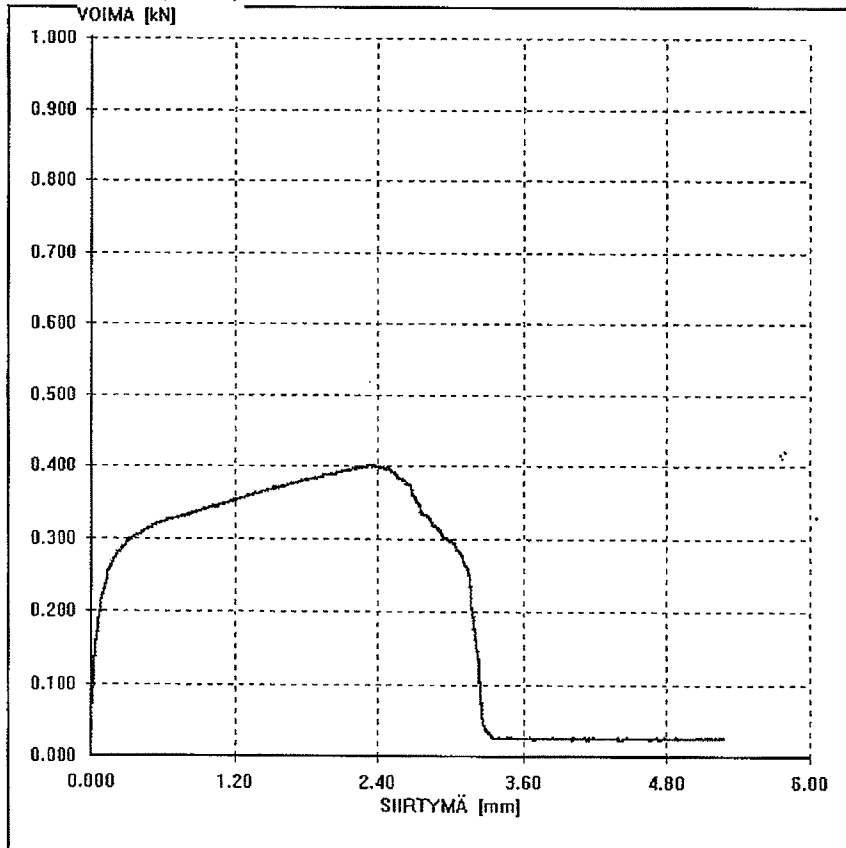
Syöttötiedot

a	0,10	mm	Koepituus	Lc	0,00	mm	
b	32,00	mm	Murtovenymä alkumittapituus	Lo	0,00	mm	
D	10,00	mm	loppumittapituus	Lu	0,00	mm	
d	0,00	mm	Venymäanturi alkumittapituus	Le	0,00	mm	
Pinta-ala	So	3,20	mm ²	Koekappaleen loppuhalkaisia	Du	0,00	mm

Lopputulokset

Suurin voima	Fm	0,400	kN	Kimmokerroin	E	0	10 ³ N/mm ²
Lujuus	Rm	125,1	N/mm ²	Korrelaatio		0,00	
Alempi myötöraja	ReL	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm ²
Ylempi myötöraja	ReH	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm ²
		0,000000		Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm ²
		0,000000		Koeaika		0,0	s
		0,000000		Murtovenymä	A _c	0,0	%
				Murtokuruuma	Z	0,0	%

Kokeen mittauspistekäyrä



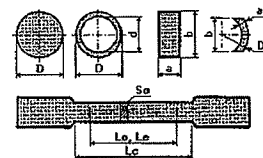


Koekappaleryhmän yleiset tiedot

EKAMK			
vetokoe			
1			
Tilaus	opinäytetyöTynkkynen		
Erä	1	Koestuspäivä	30.9.2010
Koekappale	7	Koestaja	O.O.
Huom	alumiini liitetty2		

Syöttötiedot

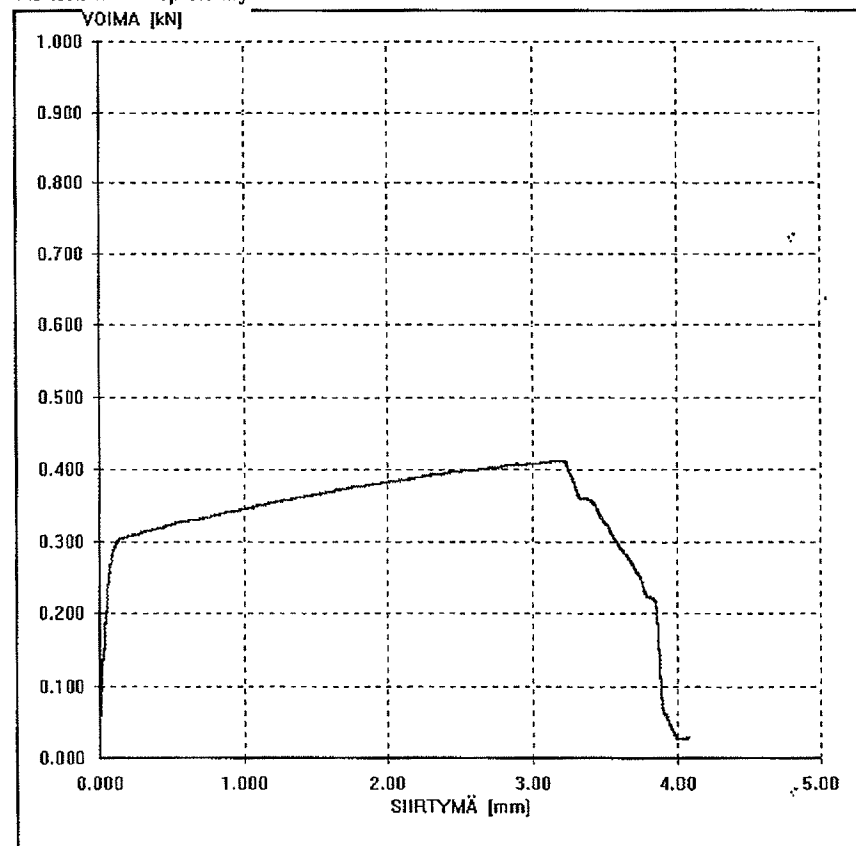
a	0,15	mm	Koepituus	Lc	0,00	mm	
b	32,00	mm	Murtovenymä alkumittapituus	Lo	0,00	mm	
D	10,00	mm	loppumittapituus	Lu	0,00	mm	
d	0,00	mm	Venymäanturi alkumittapituus	Le	0,00	mm	
Pinta-ala	So	4,80	mm ²	Koekappaleen loppuhalkaisia	Du	0,00	mm



Lopputulokset

Suurin voima	Fm	0,412	kN	Kimmokerroin	E	0	10 ³ N/mm ²	
Lujuus	Rm	85,8	N/mm ²	Korrelaatio		0,00		
Alempi myötöraja	ReL	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0	N/mm ²
Ylempi myötöraja	ReH	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0	N/mm ²
		0,000000		Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0	N/mm ²
		0,000000		Koeaika		35,1	s	
		0,000000		Murtovenymä	A	0,0	%	
				Murtokurouma	Z	0,0	%	

Kokeen mittauspistekäyrä





Koekappaleryhmän yleiset tiedot

EKAMK					
vetokoe					
1					
Tilaus	opinäytetyöTynkkynen				
Erä	1		Koestuspäivä	30.9.2010	
Koekappale	4		Koestaja	O.O.	
Huom	alumiini liittämätön2				

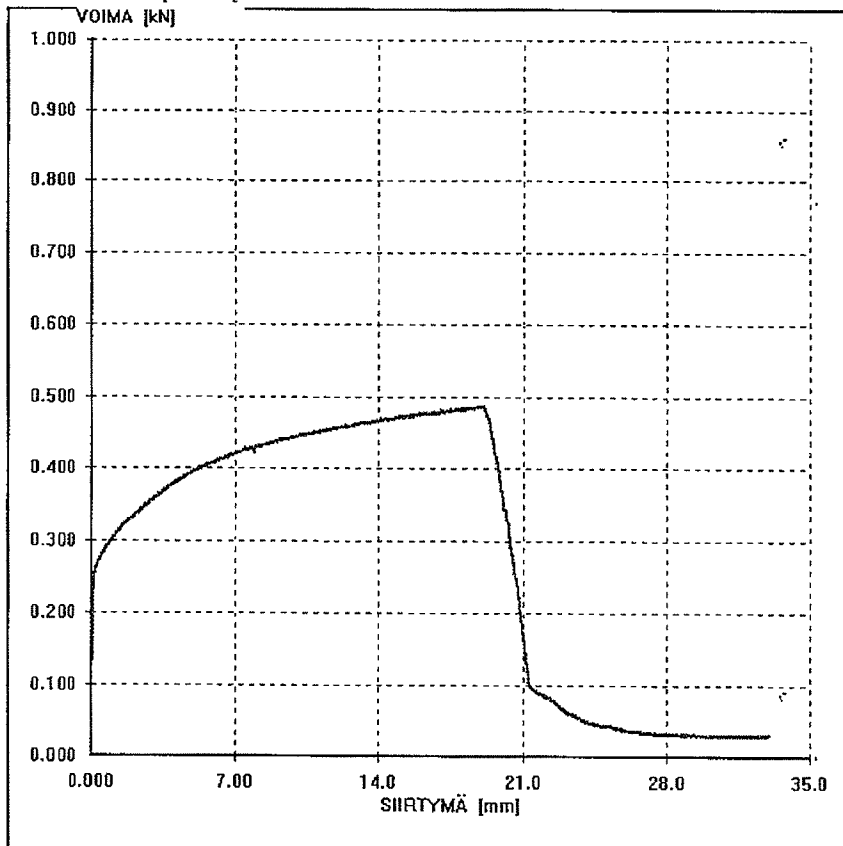
Syöttötiedot

a	0,15	mm	Koepituus	Lc	0,00	mm	
b	32,00	mm	Murtovenymä alkumittapituus	Lo	0,00	mm	
D	10,00	mm	loppumittapituus	Lu	0,00	mm	
d	0,00	mm	Venymäanturi alkumittapituus	Le	0,00	mm	
Pinta-ala	So	4,80	mm ²	Koekappaleen loppuhalkaisia	Du	0,00	mm

Lopputulokset

Suurin voima	Fm	0,487	kN	Kimmokerroin	E	0	10 ³ N/mm ²
Lujuus	Rm	101,4	N/mm ²	Korrelaatio		0,00	
Alempi myötöraja	ReL	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm ²
Ylempi myötöraja	ReH	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm ²
		0,000000		Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm ²
		0,000000		Koeaika		0,0	s
		0,000000		Murtovenymä	A	0,0	%
				Murtokuruuma	Z	0,0	%

Kokoen mittauspistekäyrä





Koekappaleryhmän yleiset tiedot

EKAMK			
vetokoe			
I			
Tilaus	opinäytetyöTynkkynen		
Erä	1		
Koekappale	11		
Huom	kupari liittämätön2		
		Kiinnitys laasti	
		Koestuspäivä	30.9.2010
		Koestaja	O.O.

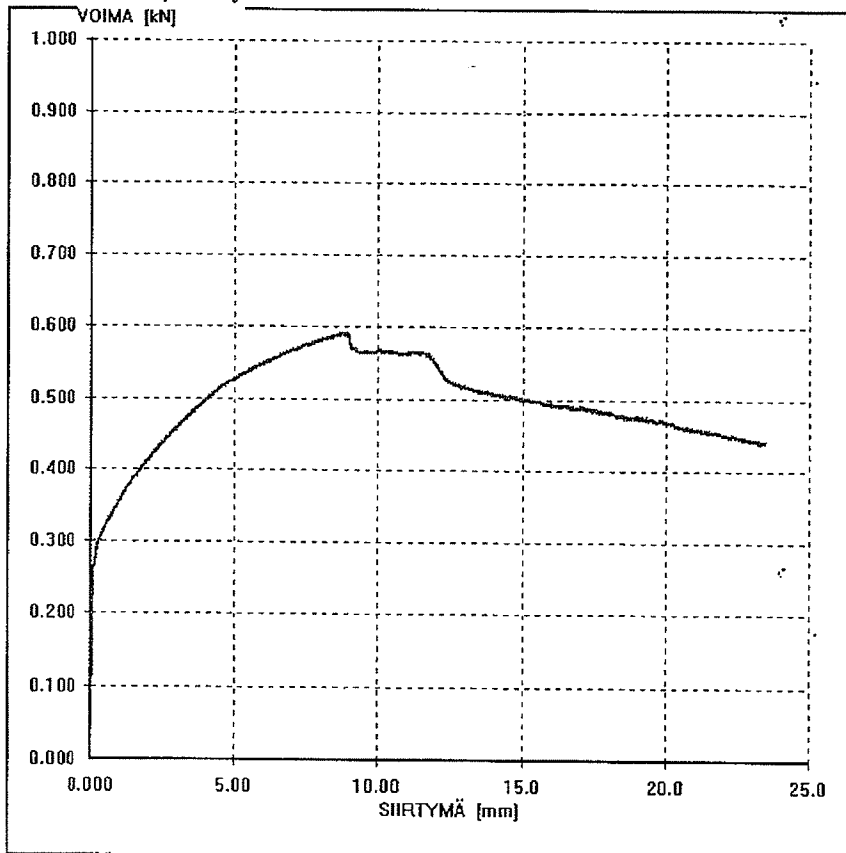
Syöttötiedot

a	0,10	mm	Koepituus	Lc	0,00	mm
b	32,00	mm	Murtovenymä alkumittapituus	Lo	0,00	mm
D	10,00	mm	loppumittapituus	Lu	0,00	mm
d	0,00	mm	Venymäanturi alkumittapituus	Le	0,00	mm
Pinta-ala	So	3,20	mm ²	Koekappaleen loppuhalkaisia	Du	0,00

Lopputulokset

Suurin voima	Fm	0,591	kN	Kimmokerroin	E	0	10 ³ N/mm ²
Lujuus	Rm	184,7	N/mm ²	Korrelaatio		0,00	
Alempi myötöraja	ReL	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm ²
Ylempi myötöraja	ReH	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm ²
		0,000000		Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm ²
		0,000000		Koeaika		0,0	s
		0,000000		Murtovenymä	A	0,0	%
				Murtokuruuma	Z	0,0	%

Kokeen mittauspistekäyrä





Koekappaleryhmän yleiset tiedot

EKAMK			
vetokoe			
I			
Tilaus	opinäytetyöTynkkynen		
Erä	1	Koestuspäivä	30.9.2010
Koekappale	10	Koestaja	O.O.
Huom	kupari liittämätön2		

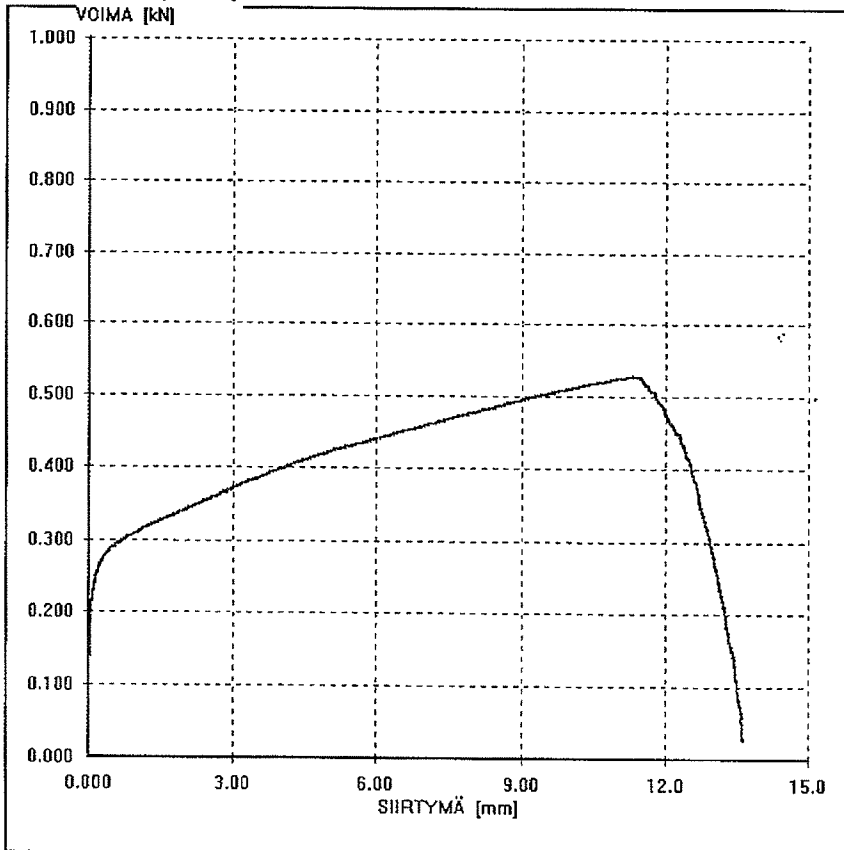
Syöttötiedot

a	0,10	mm	Koepituus	Lc	0,00	mm	
b	32,00	mm	Murtovenymä	Lo	0,00	mm	
D	10,00	mm	alkumittapituus	Lu	0,00	mm	
d	0,00	mm	loppumittapituus	Le	0,00	mm	
Pinta-ala	So	3,20	mm ²	Koekappaleen loppuhalkaisia	Du	0,00	mm

Lopputulokset

Suurin voima	Fm	0,526	kN	Kimmokerroin	E	0	10 ³ N/mm ²
Lujuus	Rm	164,5	N/mm ²	Korrelaatio		0,00	
Alempi myötöraja	ReL	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm ²
Ylempi myötöraja	ReH	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm ²
		0,000000		Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm ²
		0,000000		Koeaika		120,9	s
		0,000000		Murtovenymä	A	0,0	%
				Murtokurouma	Z	0,0	%

Kokeen mittauspistekäyrä




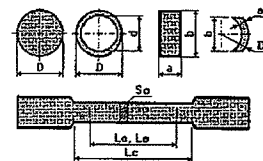


Koekappaleryhmän yleiset tiedot

EKAMK			
vetokoe			
1			
Tilaus	opinäytetyöTynkkynen		
Erä	1	Koestuspäivä	30.9.2010
Koekappale	5	Koestaja	O.O.
Huom	alumiini liittämätön		

Syöttötiedot

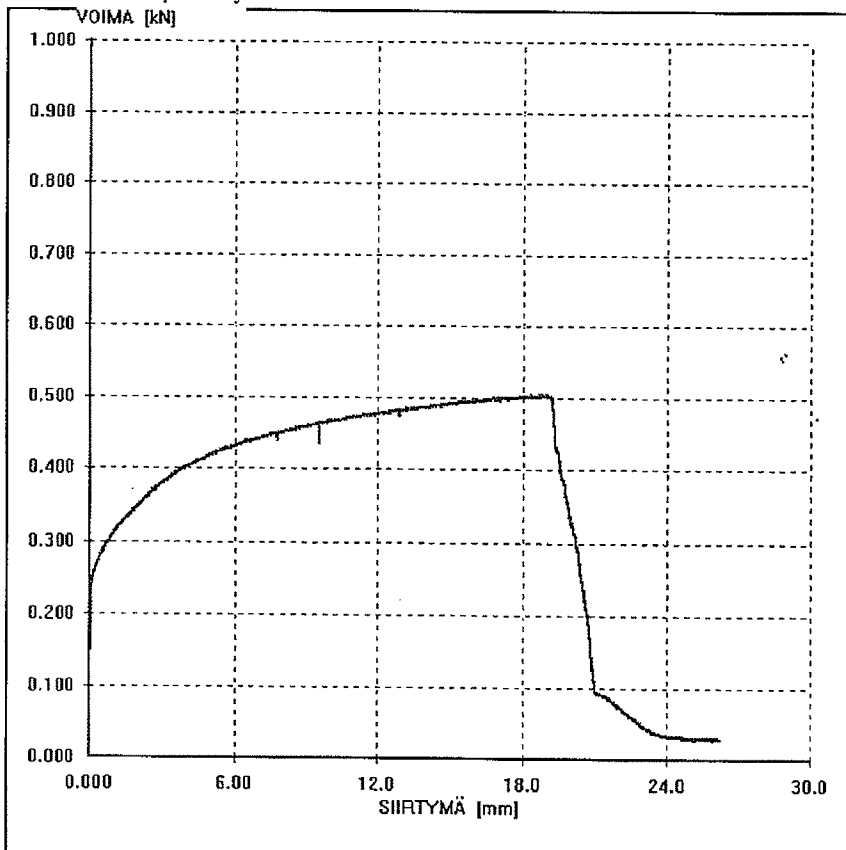
a	0,15	mm	Koepituus	Lc	0,00	mm	
b	32,00	mm	Murtovenymä alkumittapituus	Lo	0,00	mm	
D	10,00	mm	loppumittapituus	Lu	0,00	mm	
d	0,00	mm	Venymäanturi alkumittapituus	Le	0,00	mm	
Pinta-ala	So	4,80	mm ²	Koekappaleen loppuhalkaisia	Du	0,00	



Lopputulokset

Suurin voima	Fm	0,503	kN	Kimmokerroin	E	0	10 ³ N/mm ²
Lujuus	Rm	104,8	N/mm ²	Korrelaatio		0,00	
Alempi myötöraja	ReL	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm ²
Ylempi myötöraja	ReH	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm ²
		0,000000		Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm ²
		0,000000		Koeaika		0,0	s
		0,000000		Murtovenymä	A	0,0	%
				Murtokurouma	Z	0,0	%

Kokeen mittauspistekäyrä





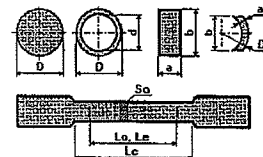
Koekappaleryhmän yleiset tiedot

EKAMK			
vetokoe			
1			
Tilaus	opinäytetyöTynkkynen		
Erä	1	Koestuspäivä	30.9.2010
Koekappale	6	Koestaja	O.O.
Huom	alumiini liitetty1		

Syöttötiedot

a	0,15	mm	Koepituus	Lc	0,00	mm	
b	32,00	mm	Murtovenymä alkumittapituus	Lo	0,00	mm	
D	10,00	mm	loppumittapituus	Lu	0,00	mm	
d	0,00	mm	Venymäanturi alkumittapituus	Le	0,00	mm	
Pinta-ala	So	4,80	mm ²	Koekappaleen loppuhalkaisia	Du	0,00	mm

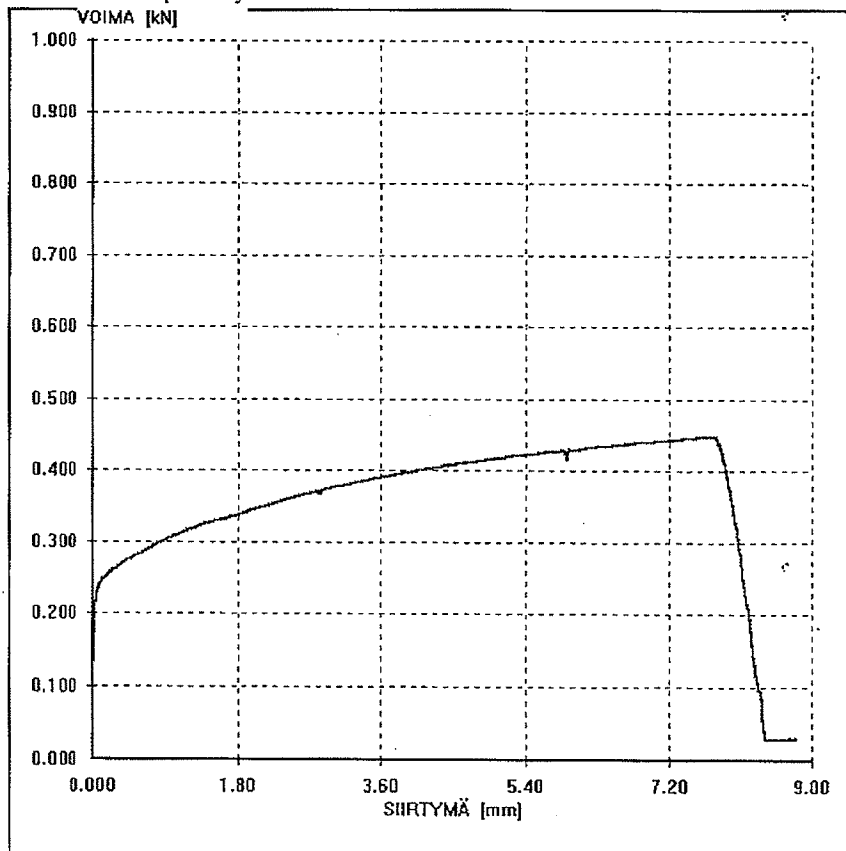
The technical drawing illustrates a tensile specimen with three cross-sectional views and a longitudinal view. The circular cross-sections are labeled with diameter 'D' and thickness 'a'. The rectangular cross-section is labeled with width 'b' and thickness 'd'. The longitudinal view shows the specimen's length with dimensions 'Lc' (total length), 'Lo' (gauge length), and 'Le' (extensometer length). A label 'So' points to the specimen's surface.



Lopputulokset

Suurin voima	Fm	0,448	kN	Kimmokerroin	E	0	10 ³ N/mm ²	
Lujuus	Rm	93,3	N/mm ²	Korrelaatio		0,00		
Alempi myötöraja	ReL	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0	N/mm ²
Ylempi myötöraja	ReH	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0	N/mm ²
		0,000000		Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0	N/mm ²
		0,000000		Koeaika		83,3	s	
		0,000000		Murtovenymä	A	0,0	%	
				Murtokurouma	Z	0,0	%	

Kokeen mittauspistekäyrä




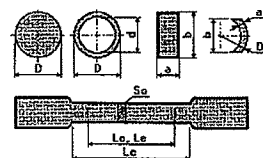


Koekappaleryhmän yleiset tiedot

EKAMK					
vetokoe					
1					
Tilaus	opinäytetyöTynkkynen				
Erä	1		Koestuspäivä	30.9.2010	
Koekappale	18		Koestaja	O.O.	
Huom	teräsnauha liitettty 1				

Syöttötiedot

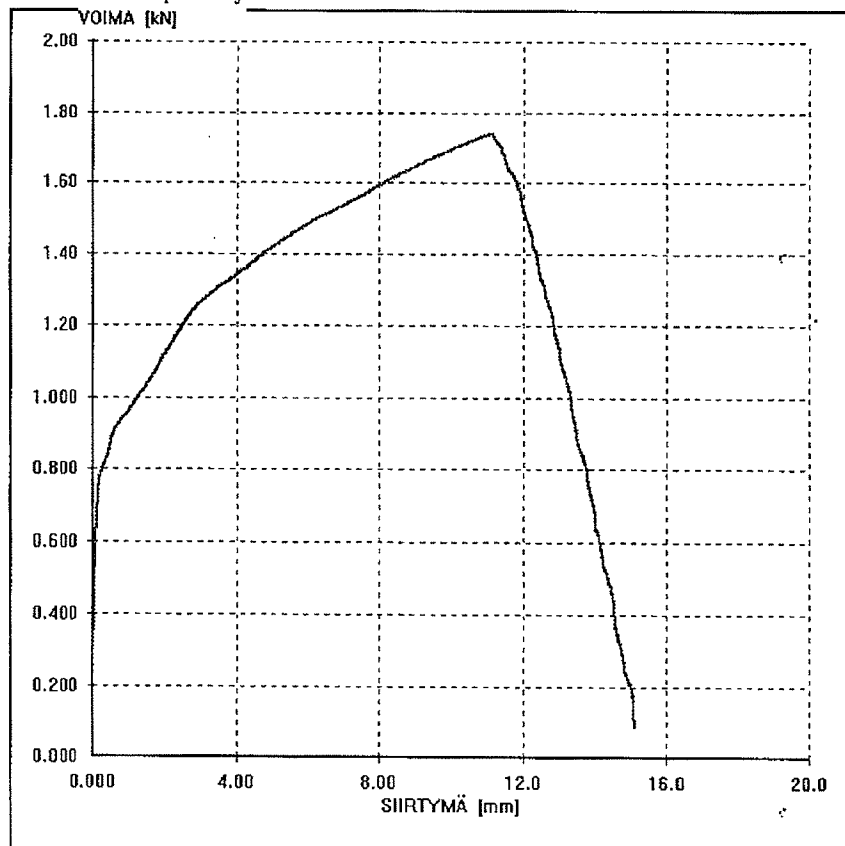
a	0,15	mm	Koepituus	Lc	0,00	mm	
b	35,00	mm	Murtovenymä alkumittapituus	Lo	0,00	mm	
D	10,00	mm	loppumittapituus	Lu	0,00	mm	
d	0,00	mm	Venymäanturi alkumittapituus	Le	0,00	mm	
Pinta-ala	So	5,25	mm ²	Koekappaleen loppuhalkaisia	Du	0,00	



Lopputulokset

Suurin voima	Fm	1,738	kN	Kimmokerroin	E_c	0	10 ³ N/mm ²
Lujuus	Rm	331,0	N/mm ²	Korrelaatio		0,00	
Alempi myötöraja	ReL	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm ²
Ylempi myötöraja	ReH	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm ²
		0,000000		Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm ²
		0,000000		Koeaika		118,9	s
		0,000000		Murtovenymä	A	0,0	%
				Murtokurouma	Z	0,0	%

Kokeen mittauspistekäyrä





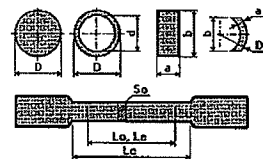
Koekappaleryhmän yleiset tiedot

EKAMK					
vetokoe					
1					
Tilaus	opinäytetyöTynkkynen				
Erä	1				
Koekappale	17				
Huom	teräsnauha liittämätön 3				
			Koestuspäivä	30.9.2010	
			Koestaja	O.O.	

Syöttötiedot

a	0,15	mm	Koepituus	Lc	0,00	mm	
b	35,00	mm	Murtovenymä alkumittapituus	Lo	0,00	mm	
D	10,00	mm	loppumittapituus	Lu	0,00	mm	
d	0,00	mm	Venymäanturi alkumittapituus	Le	0,00	mm	
Pinta-ala	So	5,25	mm ²	Koekappaleen loppuhalkaisia	Du	0,00	mm

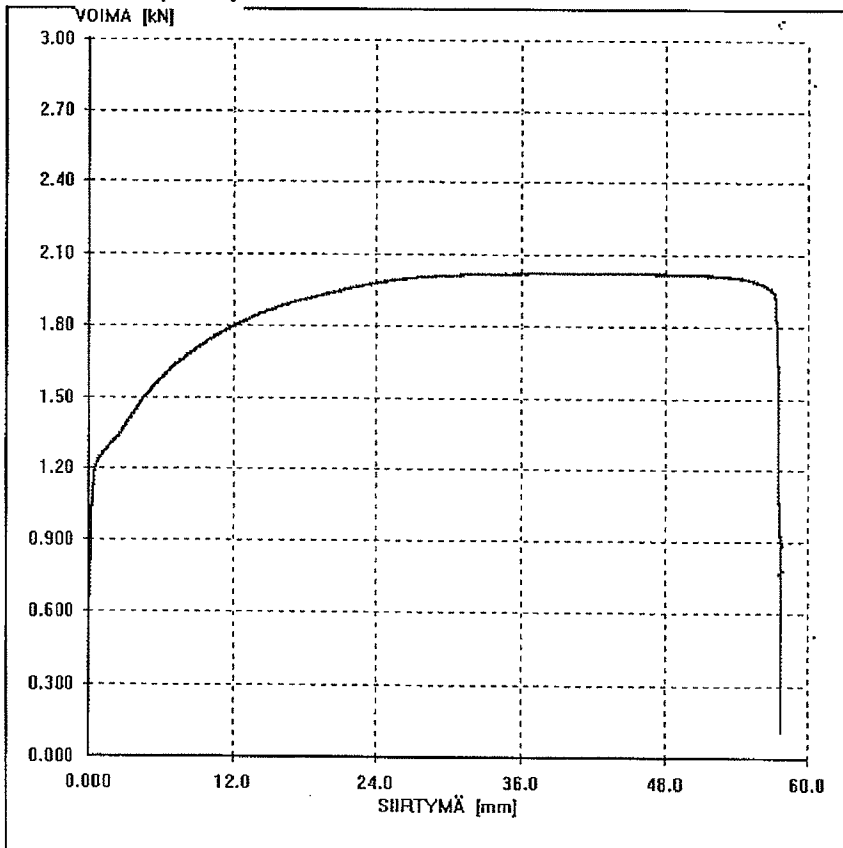
Technical drawing of a tensile test specimen. The drawing includes a circular cross-section with diameter D, a rectangular cross-section with width b and thickness a, and a longitudinal view showing the specimen's length with segments Lc, Lo, Lu, Le, and Du. A label 'So' is placed above the longitudinal view.



Lopputulokset

Suurin voima	Fm	2,018	kN	Kimmokerroin	E	0	10 ³ N/mm ²
Lujuus	Rm	384,5	N/mm ²	Korrelaatio		0,00	
Alempi myötöraja	ReL	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm ²
Ylempi myötöraja	ReH	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm ²
		0,000000		Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm ²
		0,000000		Koeaika		418,7	s
		0,000000		Murtovenymä	A	0,0	%
				Murtokuruuma	Z	0,0	%

Kokoen mittauspistekäyrä




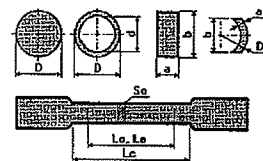


Koekappaleryhmän yleiset tiedot

EKAMK			
vetokoe			
I			
Tilaus	opinäytetyöTynkkynen		
Erä	1	Koestuspäivä	30.9.2010
Koekappale	19	Koestaja	O.O.
Huom	teräsnauha liitettty 2		

Syöttötiedot

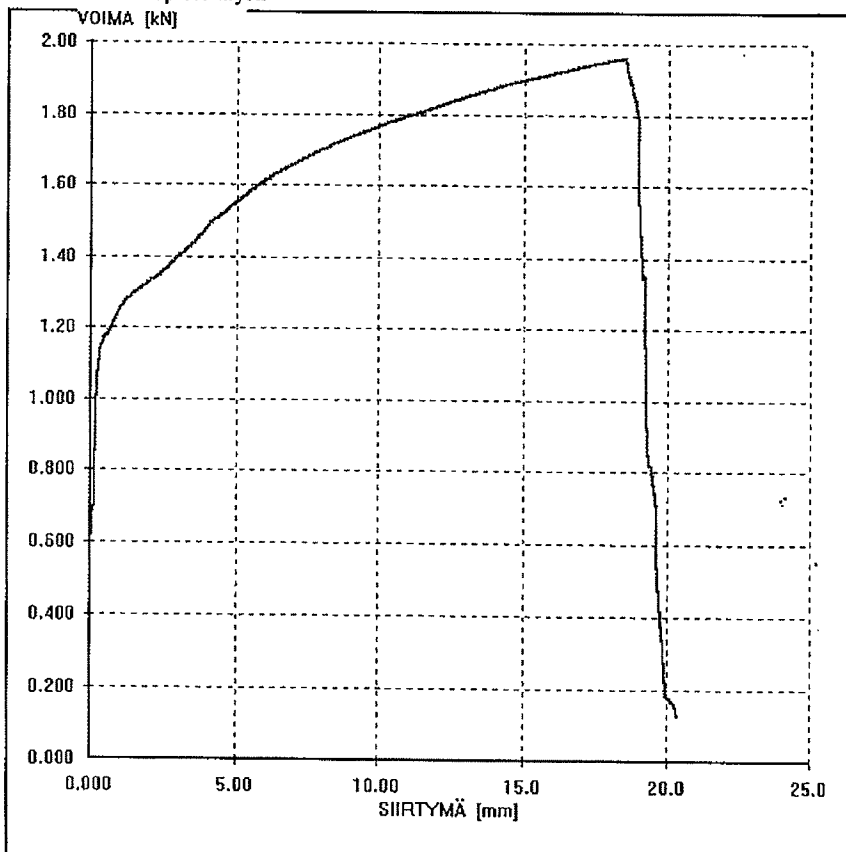
a	0,15	mm	Koepituus	Lc	0,00	mm	
b	35,00	mm	Murtovenymä alkumittapituus	Lo	0,00	mm	
D	10,00	mm	loppumittapituus	Lu	0,00	mm	
d	0,00	mm	Venymäanturi alkumittapituus	Le	0,00	mm	
Pinta-ala	So	5,25	mm ²	Koekappaleen loppuhalkaisia	Du	0,00	



Lopputulokset

Suurin voima	Fm	1,957	kN	Kimmokerroin	E	0	10 ³ N/mm ²
Lujuus	Rm	372,8	N/mm ²	Korrelaatio		0,00	
Alempi myötöraja	ReL	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm ²
Ylempi myötöraja	ReH	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm ²
		0,000000		Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm ²
		0,000000		Koeaika		196,3	s
		0,000000		Murtovenymä	A	0,0	%
				Murtokuruuma	Z	0,0	%

Kokeen mittauspistekäyrä






Koekappaleryhmän yleiset tiedot

EKAMK					
vetokoe					
1					
Tilaus	opinäytetyöTynkkynen				
Erä	1	Koestuspäivä	30.9.2010		
Koekappale	20	Koestaja	O.O.		
Huom	teräsnauha liitetty 3				

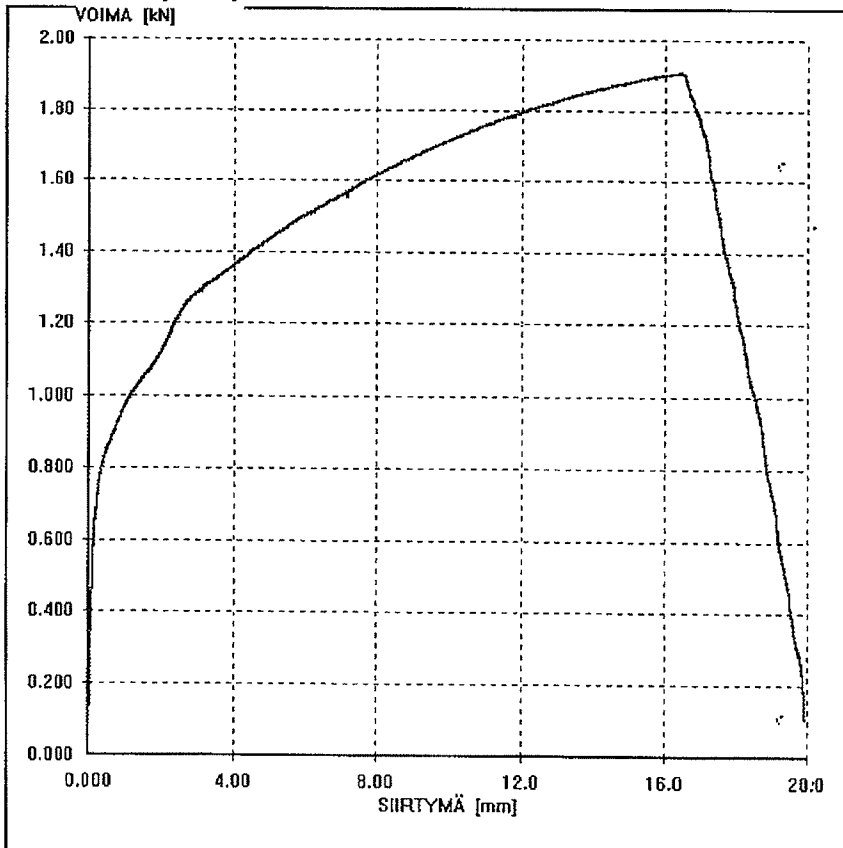
Syöttötiedot

a	0,15	mm	Koepituus	Lc	0,00	mm	
b	35,00	mm	Murtovenymä alkumittapituus	Lo	0,00	mm	
D	10,00	mm	loppumittapituus	Lu	0,00	mm	
d	0,00	mm	Venymäanturi alkumittapituus	Le	0,00	mm	
Pinta-ala	So	5,25	mm ²	Koekappaleen loppuhalkaisia	Du	0,00	

Lopputulokset

Suurin voima	Fm	1,904	kN	Kimmokerroin	E	0	10 ³ N/mm ²
Lujuus	Rm	362,7	N/mm ²	Korrelaatio		0,00	
Alempi myötöraja	ReL	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm ²
Ylempi myötöraja	ReH	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm ²
		0,000000		Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm ²
		0,000000		Koeaika		173,2	s
		0,000000		Murtovenymä	A	0,0	%
				Murtokuruuma	Z	0,0	%

Kokeen mittauspistekäyrä

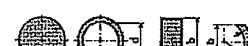


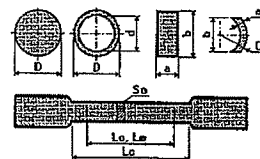


Koekappaleryhmän yleiset tiedot

EKAMK			
vetokoe			
1			
Tilaus	opinäytetyöTynkkynen		
Erä	1	Koestuspäivä	30.9.2010
Koekappale	15	Koestaja	O.O.
Huom	teräsnauha liittämätön 1		

Syöttötiedot

a	0,15	mm	Koepituus	Lc	0,00	mm	
b	35,00	mm	Murtovenymä alkumittapituus	Lo	0,00	mm	
D	10,00	mm	loppumittapituus	Lu	0,00	mm	
d	0,00	mm	Venymäanturi alkumittapituus	Le	0,00	mm	
Pinta-ala	So	5,25	mm ²	Koekappaleen loppuhalkaisia	Du	0,00	



Lopputulokset

Suurin voima	Fm	2,010	kN	Kimmokerroin	E	0	10 ³ N/mm ²
Lujuus	Rm	382,9	N/mm ²	Korrelaatio		0,00	
Alempi myötöraja	ReL	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 % 0,0	N/mm ²
Ylempi myötöraja	ReH	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 % 0,0	N/mm ²
		0,000000		Venymisraja	Rp	0,00 % 0,0	N/mm ²
		0,000000		Koeaika		426,9	s
		0,000000		Murtovenymä	A	0,0	%
				Murtokurouma	Z	0,0	%

Kokeen mittauspistekäyrä

